

**Rui Jardim de Faria Impacto de um STATCOM num
sistema elétrico com cogeração**

Dissertação submetida como requisito parcial para
obtenção do grau de **Mestre em Engenharia
Eletrotécnica e de Computadores – perfil de
Energias Renováveis e Sistemas de Potência**

Júri

Presidente: Doutor José Henrique Querido
Maia, ESTSetúbal

Orientador: Doutor Victor Manuel de Carvalho
Fernão Pires, ESTSetúbal

Vogal: Professor Carlos Manuel Teixeira
Fortunato, ESTSetúbal

À minha Avó materna,

Ângela

Agradecimentos

Começo por agradecer especialmente ao meu orientador, Professor Doutor Victor Manuel Fernão Pires, pela sua dedicação, competência, disponibilidade e também por me ter apoiado incondicionalmente em todas as fases desta dissertação.

Agradeço a todos os docentes da Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, do Departamento de Engenharia Eletrotécnica, que contribuíram ao longo de todo o percurso do Mestrado, para o culminar do presente trabalho.

Não posso deixar de agradecer também a empresa SIDUL Açúcares e a todos os colegas da empresa, por todo o suporte e apoio ao longo de todo o Mestrado.

Aos meus amigos e colegas de Mestrado, pois o apoio destes também foi fundamental para a realização da dissertação.

Agradeço à Inês pelo apoio absoluto ao longo de todo o Mestrado e pela sua ajuda nos momentos mais difíceis, a Manuela e ao Jorge por todo o suporte ao longo deste percurso.

Expresso o meu profundo agradecimento aos meus pais, irmãos e restantes familiares pois sem eles nada disto era possível.

Resumo

Neste trabalho é apresentado um estudo do impacto de um sistema de compensação num sistema elétrico com cogeração perante perturbações ao nível da tensão. Para tal, será analisada a utilização de um sistema do tipo compensador síncrono estático (*STATCOM*). Neste contexto será abordada a evolução deste sistema, assim como as suas metodologias de controlo e aplicabilidades. O sistema elétrico que será estudado tem a particularidade de englobar um ciclo de cogeração, composto por uma turbina a vapor e uma máquina síncrona, onde se constata que o compensador síncrono estático irá atenuar as perturbações associadas à tensão. Neste caso de estudo, o sistema será integrado no nível da média tensão onde se encontra conectada a cogeração. São apresentados os vários ciclos de cogeração, assim como a implementação do compensador síncrono estático numa instalação com cogeração. Tendo por objetivo verificar o comportamento do sistema elétrico em estudo com o dispositivo *STATCOM*, serão apresentados diversos resultados de simulação.

Palavras-chave: *STATCOM* (Compensador síncrono estático), cogeração, máquina síncrona, turbina de vapor, destabilizações de tensão, simulação.

Abstract

This work presents a study of the impact of a compensation system in an electrical system with cogeneration under disturbances at the voltage level. Thus, it will be assessed the use of a static synchronous compensator system (STATCOM). In this context it will be discussed the evolution of this system and its control methodologies and applicability. The electrical system that will be studied, has the particularity to include a cogeneration cycle, consisting of a steam turbine and a synchronous machine, where it will be possible to verify that the static synchronous compensator will attenuate the perturbations associated to the voltage. In this case study, the system will be integrated at the level of medium voltage where is connected the cogeneration. Will be presented the various cycles of cogeneration, as well the implementation of the static synchronous compensator in an installation with cogeneration. With the objective to verify the behavior of the electrical system under study with the STATCOM device, will be presented various simulation results.

Keywords: *STATCOM* (Static synchronous compensator), cogeneration, synchronous machine, steam turbine, voltage sags, simulation.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Índice	viii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas e Acrónimos	xiii
Capítulo 1	1
1.1 Introdução	1
1.2 Organização Dissertação.....	2
Capítulo 2	3
Compensadores Estáticos <i>STATCOM</i>	3
2.1 Histórico <i>STATCOM</i>	3
2.2 Aplicação <i>STATCOM</i>	4
2.3 Aplicações atuais	6
2.3.1 Parque eólico de Whitelee (Escócia).....	7
2.3.2 Subestação de Dongguan (China)	8
2.4 Componentes do controlo do <i>STATCOM</i>	9
2.5 Ligação do <i>STATCOM</i>	10
2.6 Métodos de controlo do <i>STATCOM</i>	11
2.7 Dispositivo <i>STATCOM</i> aplicados aos parques eólicos.....	13
2.8 Compensação da potência reativa associado à cogeração	14
2.9 Controlo da Potência Reativa.....	20
Capítulo 3	21
Sistema de compensação <i>STATCOM</i>	21
3.1 Princípios de operação do dispositivo <i>STATCOM</i>	21
3.2 Topologia adotada.....	23
3.3 Modelação do sistema.....	24
3.4 Controlo do sistema	27
3.4.1 Controlo das potências	27
3.4.2 Controlo de correntes (Controlador por banda de histerese).....	29
3.4.3 Controlo de tensão.....	29
3.4.4 <i>PLL – Phase Locked Loop</i>	33

3.5 Resultados simulação.....	35
Capítulo 4	41
Sistema de Cogeração.....	41
4.1 Definição de cogeração.....	41
4.2 Vantagens da cogeração.....	41
4.3 Desvantagens da cogeração	42
4.4 Sistemas de cogeração	42
4.4.1 Turbina de Vapor (Ciclo de Rankine).....	43
4.4.2 Ciclo combinado	45
4.4.3 Motor alternativo de combustão interna (ciclo Diesel ou Otto).....	46
4.4.4 Micro-Turbinas.....	47
4.4.5 Pilha de combustível	48
Capítulo 5	49
Implementação do <i>STATCOM</i> numa instalação com cogeração.....	49
5.1 <i>STATCOM</i> associado ao sistema de cogeração	49
5.2 Resultados de simulação sem <i>STATCOM</i>	51
5.3 Resultados de simulação com o <i>STATCOM</i>	55
Capítulo 6	63
Conclusões.....	63
Referências bibliográficas	65

Lista de Figuras

Figura 1 - Característica de operação do <i>STATCOM</i> [3].....	6
Figura 2 – <i>STATCOM</i> Instalado em Whitelee [30]	7
Figura 3 – <i>STATCOM</i> Instalado na Subestação de Dongguan [31]	8
Figura 4 – Diagrama de blocos do <i>STATCOM</i> [14]	10
Figura 5 – Ligação <i>STATCOM</i> na Rede de Distribuição.....	11
Figura 6 – Diagrama unifilar do <i>SVC</i> instalado na subestação São Luís II [32]	17
Figura 7 – Elementos constituintes de um <i>TCR</i> [32].....	18
Figura 8 – Elementos constituintes de um <i>TSC</i> [32]	18
Figura 9 – Representação de um <i>SVC</i> [32].....	19
Figura 10 – Curva Característica Tensão/Corrente do <i>SVC</i> [32].....	19
Figura 11 – Esquema simplificado de um sistema de potência [37]	21
Figura 12- diagrama vetorial das tensões e correntes.....	22
Figura 13 – Aumento tensão CC [37].....	23
Figura 14 – Diminuição tensão CC[37].....	23
Figura 15 – Estrutura inversor para análise	24
Figura 16 – Circuito equivalente do conversor em coordenadas <i>dq</i> [43].....	29
Figura 17 – Circuito equivalente do conversor em coordenadas <i>dq</i> [43].....	31
Figura 18 – Diagrama de blocos do circuito <i>PLL</i> [33]	34
Figura 19 – Sistema de blocos.....	35
Figura 20 – Tensão e corrente (carater capacitivo)	36
Figura 21 – Correntes à saída dispositivo <i>STATCOM</i> (carater capacitivo).....	36
Figura 22 – Tensão e corrente (carater indutivo)	37
Figura 23 – Correntes à saída dispositivo <i>STATCOM</i> (carater indutivo).....	37
Figura 24 – Tensão e corrente (carater capacitivo para indutivo)	38
Figura 25 – Tensão e correntes (carater indutivo para capacitivo).....	39
Figura 26 – Ciclo de turbina de condensação com extração de vapor [21].....	44
Figura 27 – Ciclo de turbina de vapor em contrapressão [21].....	44
Figura 28 – Cogeração de ciclo combinado [21].....	45
Figura 29 – Ciclo de um motor de combustão interna (Diesel e Otto) [21]	46
Figura 30 – Micro turbina [25]	47
Figura 31 – Célula de combustível individual [23]	48
Figura 32 – Exemplo de ciclo de cogeração com <i>STATCOM</i>	50
Figura 33 – Diagrama blocos Simulação turbina e máquina síncrona	51

Figura 34 – Desvio velocidade do rotor (p.u).....	52
Figura 35 – Potência (p.u) Entrada Máquina Síncrona	52
Figura 36 – Tensão V_d sistema de excitação (p.u).....	53
Figura 37 – Tensão V_q sistema de excitação (p.u).....	53
Figura 38 – Corrente I_{abc} saída máquina síncrona	54
Figura 39 – Tensão simples saída máquina síncrona	54
Figura 40 – Aspeto geral simulação com <i>STATCOM</i>	55
Figura 41 – Aspeto geral dos elementos do interior do <i>STATCOM</i>	55
Figura 42 – Correntes I_{abc} da máquina síncrona com defeito na rede (Sem <i>STATCOM</i>) $R_{ON}=1\Omega$	56
Figura 43 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (Sem <i>STATCOM</i>) $R_{ON}=1\Omega$	57
Figura 44 – Corrente I_{abc} máquina síncrona com defeito na rede (Com <i>STATCOM</i>) $R_{ON}=1\Omega$	57
Figura 45 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (com <i>STATCOM</i>) $R_{ON}=1\Omega$	58
Figura 46 – Corrente reativa injetada pelo <i>STATCOM</i> ($R_{ON}=1\Omega$)	58
Figura 47 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (Sem <i>STATCOM</i>) $R_{ON}=1,5\Omega$	59
Figura 48 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (com <i>STATCOM</i>) $R_{ON}=1,5\Omega$	59
Figura 49 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (Sem <i>STATCOM</i>) $R_{ON}=0,5\Omega$	60
Figura 50 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (Com <i>STATCOM</i>) $R_{ON}=0,5\Omega$	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Variações tensão barramento Vs Corrente reativa injetada.....	61
--	----

Lista de Siglas e Acrónimos

AT – Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CLC – *Closed Loop Controller*

DVR- Dynamic Voltage Restorer

GTO – *Gate Turn-Off Thyristor*

IEGT – *Injection Enhanced Gate Transistor*

IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor* (Transístor Bipolar de Porta Isolada)

IGCT – *Integrated Gate-Commutated Thyristor*

MT – Média Tensão

PI – Proporcional Integral

PLL – *Phase Locked Loop*

PWM – *Pulse Width Modulation*

Q – Potência reativa.

SHEPWM – *Selective Harmonic Eliminated Pulse Width Modulation*

SPWM – *Sinusoidal Pulse Width Modulation*

STATCOM – *Static Synchronous Compensator*

SVC – *Static VAR Compensator*

TSC – *Thyristor Switched Capacitor*

TSR – *Thyristor Switched Reactor*

TCR– *Thyristor Controlled Reactor*

V_{STATCOM} – Nível de tensão de saída do *STATCOM*

V_s – Nível de tensão do sistema a compensar

X – Impedância equivalente entre o *STATCOM* e o sistema a compensar

I_{abc} – Corrente de saída da máquina síncrona

Lista de Símbolos

R_{on} – Resistência de defeito

U_n – Tensão nominal

K_p – Ganho proporcional

K_i – Ganho integral

V_1 – Tensão amostragem fase 1

V_2 – Tensão amostragem fase 2

V_s – Tensão simples

V_f – Tensão excitação

V_d – Tensão direta

V_q – Tensão em quadratura

I_d – Corrente direta

I_q – Corrente em quadratura

abc – Sistema trifásico

dq – Sistema bifásico (eixo direto e em quadratura)

$\alpha\beta$ - Sistema bifásico (alfa beta)

I_α – Corrente alfa

I_β – Corrente Beta

ω – Velocidade angular [rad/s]

φ – Ângulo de defasamento entre tensão e corrente [°]

ω_0 - Frequência natural

ζ - Tempo de integração

ξ – Fator de amortecimento do sistema

ω_n - Frequência angular das oscilações amortecidas

p - Valor do polo

Capítulo 1

1.1 Introdução

Verifica-se nos dias de hoje que o consumo de energia elétrica, tem aumentado consideravelmente, isto devido ao facto de se recorrer a sistemas elétricos/eletrónicos sofisticados que em muitas aplicações substituem os sistemas que anteriormente eram mecânicos. Devido a este facto existe uma necessidade acrescida de garantir a qualidade e a continuidade de serviço no fornecimento de energia elétrica, de forma a não perturbar os demais dispositivos eletrónicos: Variadores de velocidade, Controladores lógicos programáveis, robôs e todos os sistemas de segurança, que necessitam de energia elétrica de forma ininterrupta [1][2].

Constata-se que na presença de uma cava de tensão, a operacionalidade de toda uma linha de montagem poderá ficar em risco. Deste modo, para solucionar este tipo de problema [1], existem diversos dispositivos, tais como os compensadores dinâmicos de tensão (DVR) [35][36]. Os dispositivos compensadores estáticos (STATCOM), que permitem compensar a energia reativa, poderão também atenuar o problema da queda de tensão de forma a garantir a continuidade de serviço da instalação [1][2].

No trabalho em questão, será apresentado um estudo de uma turbina a vapor, acoplada a uma máquina síncrona de rotor cilíndrico com potência de 6 MVA, em que este sistema encontra-se interligado a uma rede de distribuição. No entanto existe a particularidade de quando se verifica uma falha da alimentação por parte do fornecedor de energia a cogeração poderá ficar a funcionar em “Ilha” de forma a alimentar as cargas de toda a instalação industrial.

De forma a estudar quais as possíveis melhorias a efetuar nos sistemas elétricos que compõem a cogeração e a rede elétrica da unidade fabril, efetuou-se um levantamento dos parâmetros da máquina síncrona existente numa instalação genérica, assim como da rede de baixa tensão/média tensão que compõem toda a instalação elétrica. Neste contexto, é apresentado um estudo de um dispositivo *STATCOM* para estabilizar o funcionamento da cogeração. Também serão apresentados resultados de simulação através do software Matlab/Simulink.

1.2 Organização Dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em vários capítulos de forma a permitir uma leitura clara e inequívoca dos tópicos abordados. No capítulo 1 é efetuada a apresentação do trabalho assim como os vários tópicos a abordar. No capítulo 2 do trabalho, é apresentado o histórico, os métodos de controlo, as aplicações, e controlo da potência reativa do dispositivo *STATCOM*.

No capítulo 3 do trabalho é explicado os princípios de operação do dispositivo *STATCOM*, a topologia adotada, modelação do sistema, assim como o controlo do *STATCOM*. São ainda apresentados resultados de simulação do dispositivo *STATCOM* isolado da cogeração. O capítulo 4 é dedicado aos sistemas de cogeração, onde é apresentado as vantagens e desvantagens da cogeração, assim como os vários sistemas de cogeração.

O capítulo 5 encontra-se destinado a implementação do *STATCOM* numa instalação com cogeração, neste capítulo são apresentados os resultados de simulação, dos vários elementos que compõem a rede/sistema elétrico. Finalmente no capítulo 6 é apresentado as conclusões finais de todo o trabalho.

Capítulo 2

Compensadores Estáticos *STATCOM*

No presente capítulo pretende-se, apresentar um histórico e a evolução dos dispositivos *STATCOM*(compensadores estáticos), qual a sua aplicabilidade, quais as suas vantagens/desvantagens e como deverão ser aplicados.

2.1 Histórico *STATCOM*

O Estudo do *STATCOM* iniciou-se em 1976, no Japão, num trabalho de pesquisa e desenvolvimento que foi executado por um grupo de cientistas da Mitshubishi Eletric Corporation e da Kansas City Ltd. O objetivo do desenvolvimento deste dispositivo era o de obter um equipamento que fornecesse uma maior corrente reativa, um controlo melhorado, na eliminação das cavas de tensão e controlo da tensão, assim como diminuir o tamanho do equipamento. Deste modo procurou-se evitar a utilização de grandes condensadores e reactâncias tal como era utilizado nos dispositivos *SVC* [5].

Após o trabalho de pesquisa e desenvolvimento, no início da década de 80, um protótipo com potência de 20 MVA, e uma tensão de 77 kV estava já construído e testado. Para este protótipo recorreu-se à utilização de semicondutores de potência do tipo tirístores. No entanto verificaram-se alguns problemas com este equipamento devido ao facto de se utilizar circuitos de comutação forçada, que tinham uma complexidade elevada e uma baixa taxa de fiabilidade. Apesar de alguns problemas o protótipo desenvolvido apresentou bons resultado [5] [6].

No início dos anos 90 um grupo de investigadores, também do japão, desenvolveu um novo protótipo de 80 MVA e 154 kV. No entanto os testes dos controladores foram efetuados num modelo de 2 kVA, 200 V, e os testes da parte de potência foram realizados com um sistema de potência de 8 MVA e tensão 50 kV [10].

No ano de 1992, entrou em serviço o *STATCOM*, pertencente a Kansay Eletric Co, Ltd. Este equipamento tinha uma potência de 80 MVA, uma tensão de 154 kV, utiliza semicondutores *GTO*, com tensão 4,5 kV e com corrente 3 kA [11].

Um outro exemplo aconteceu também na década de 90, mais precisamente no ano de 1995, onde foi colocado em Tennessee (Estados Unidos da América), um equipamento com 100 MVA de potência, com semicondutores de potências do tipo *GTO* com tensão de 4,4 kV e corrente de 4kA [12].

Em 2000, foi instalado e comissionado no Kentucky (EUA), um equipamento com potência de 160 MVA, que se encontra conectado a uma linha de alta tensão de 168 kV [13].

De salientar que o facto de a eletrónica de potência, na década de 70, ainda não estar muito desenvolvida influenciou o desenvolvimento do *STATCOM*, e eventualmente de outros equipamentos, o que levou a que a pesquisa e desenvolvimento do mesmo, reinicia-se em força, no início da década de 80, logo após o grande desenvolvimento de semicondutores (*GTO*), em que já se poderia operar com tensões de 4,5 kV e com correntes de cerca de 2,5 kA [8].

Nos nossos dias já se utilizam semicondutores que permitem operar com tensões superiores a 6,5 kV e com correntes de 6 kA, como por exemplo, os *IEGT's* e os *IGBT's*.

2.2 Aplicação STATCOM

Os compensadores síncronos estáticos (*STATCOM*), são utilizados para compensar a energia reativa. No entanto, estes dispositivos também poderão atenuar problemas associados às cavas de tensão que muitas vezes se verificam numa dada instalação, tal como, o evitar as interrupções de fornecimento de energia elétrica às cargas [2].

È normalmente considerado uma cava tensão, uma redução da tensão nominal entre 0.1 p.u a cerca de 0.9 p.u da tensão eficaz, com uma duração entre meio ciclo e até vários segundos [1].

As cavas de tensão são um dos maiores problemas, no fornecimento de energia. De fato, estudos efetuados comprovam que cerca de 90% dos problemas de perturbações na rede elétricas, são originados pelas cavas de tensão, os transitórios e as interrupções momentâneas [2].

Tal como referido, o *STATCOM* é usado em grande maioria das aplicações para gerar ou absorver potência reativa [1].

Para compensar uma cava de tensão num sistema elétrico poderá se injetar uma corrente com uma determinada amplitude, frequência e fase para a rede elétrica. Por forma a verificar qual o valor exato de corrente a ser injetado na rede elétrica, o sistema deverá obter uma amostra da parte ativa, reativa e verificar qual a sequência (se é positiva ou negativa) [2].

Em algumas grandes cidades de países como por exemplo o Canadá, encontram-se instaladas grandes indústrias da área de metalúrgica, e de extração de minérios. Nestas indústrias constata-se que em muitos casos se recorre à utilização de compensadores estáticos (*STATCOM*), devido ao facto deste tipo de indústria, utilizar em grande parte dos casos motores de grande potência e fornos elétricos.

Este tipo de carga solicita num curto espaço de tempo muita potência à rede elétrica o que provoca em muitos casos, cavas de tensão, que irão prejudicar muitos utilizadores da rede elétrica. Por forma a solucionar o problema são instalados estrategicamente *STATCOMs*, que irão permitir aumentar a qualidade e continuidade de serviço de toda a rede elétrica [3].

Um exemplo prático da instalação de um *STATCOM*, foi quando abriu uma nova mina de ouro, em Ontario, no Canadá, e onde se instalaram seis unidades de 4,5 MVAR cada uma, de forma a regular a tensão em toda rede elétrica da instalação. Este investimento, apesar de ser elevado, teve um retorno muito rápido, pois com a instalação do sistema, verificou-se índices excelentes da qualidade de energia de todo o sistema de elétrico, garantindo desta forma uma boa performance global da instalação [4].

O dispositivo *STATCOM*, permite fornecer uma potência reativa, assim como, alternar de uma forma instantânea, a potência reativa entre cada uma das fases do sistema trifásico. O *STATCOM* utiliza semicondutores totalmente controlados, sendo os componentes mais utilizados os transístores bipolares de porta isolada *IGBT's*, *IGCT* ou *GTO*. Ao se recorrer a este tipo de componentes, será possível obter um melhor controlo e uma maior rapidez de todo o sistema, uma vez que estes semicondutores permitem controlar com frequências relativamente elevadas. Comparando o dispositivo *STATCOM* (que como já foi referido utiliza semicondutores totalmente controlados) com o dispositivo *SVC*, em que neste recorre-se a semicondutores semicomandados, o

que se irá verificar é que com o *STATCOM* obtém-se um maior grau de autonomia no controlo e uma melhor performance de todo o sistema [3]. Por outro lado, o *STATCOM* também permite gerar tensões e correntes com menor distorção harmónica.

Um das grandes vantagens do dispositivo *STATCOM* está relacionado com o facto de se conseguir colocar toda a potência reativa necessária, mesmo que a tensão no barramento esteja muito abaixo do nominal [15]. Na figura 1 apresenta-se a curva característica típica de funcionamento da tensão em função da corrente, fornecida pelo *STATCOM*.

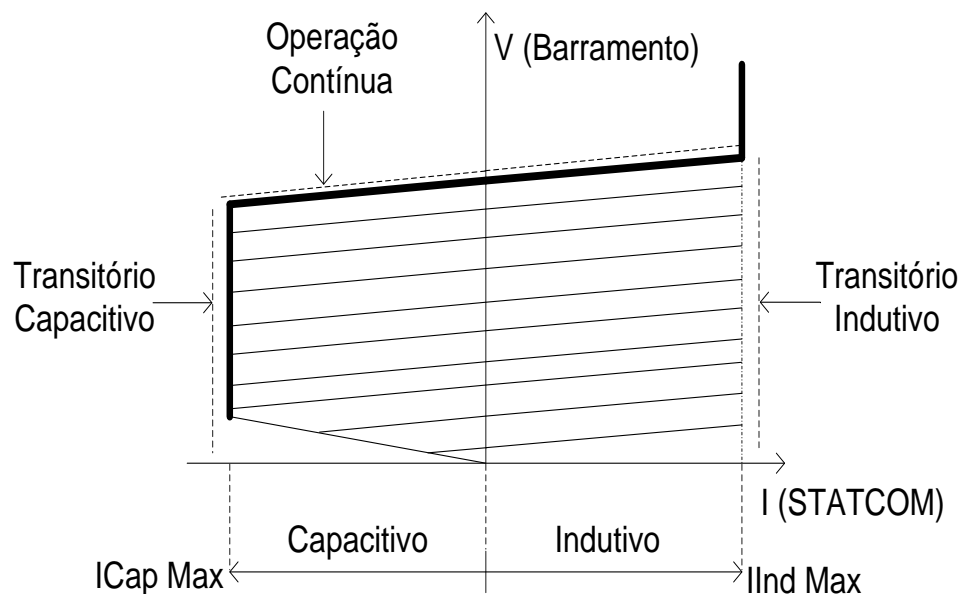


Figura 1 - Característica de operação do *STATCOM* [3]

2.3 Aplicações atuais

Constata-se em muitos projetos atuais, a necessidade de recorrer à instalação de dispositivos *STATCOM*, nos sistemas elétricos, devidos às inúmeras vantagens destes equipamentos tal como descritos no presente trabalho (Capítulo 2.2). Uma das maiores aplicações do *STATCOM* é nos parques eólicos, isto porque existe uma grande necessidade de aumentar a fiabilidade do sistema de transmissão e em simultâneo cumprir com as regulamentações de todos os limites das grandezas elétricas envolvidas.

2.3.1 Parque eólico de Whitelee (Escócia)

Um recente exemplo de aplicação foi no maior parque eólico terrestre da Europa, que fica localizado em Whitelee (Escócia). Este parque é composto por cerca de 215 Turbinas, onde se verifica que 75 turbinas foram aplicadas há menos de 3 anos, e tendo o parque uma capacidade total de geração de energia elétrica de 539 MW [30].

Com a adição de mais 75 turbinas, surgiu a necessidade de instalar um equipamento que efetua a compensação de energia reativa de uma forma fiável e contínua. Com o intuito de efetuar a compensação da potência reativa, foram projetados, instalados e comissionados pela ABB, três compensadores síncronos estáticos (*STATCOM*), com capacidade individual de 15 MVAR (Figura 2). Estas unidades encontram-se conectadas no nível de tensão dos 33 kV por forma a ir de encontro com todos os requisitos do sistema elétrico em questão [30].

O equipamento fornecido (PCS600) pela ABB, para o parque eólico, tem uma eficiência de cerca de 98% e permite a geração ou absorção de energia reativa, recorrendo a semicondutores e a técnicas de processamento eletrónicos que vão incidir sobre as formas ondas de tensão e corrente. No entanto constata-se que não é necessário adicionar bancos de condensadores ou reatores *shunt*, por forma a variar a tensão para um nível superior ou inferior [30].



Figura 2 – *STATCOM* Instalado em Whitelee [30]

2.3.2 Subestação de Dongguan (China)

Um dos países com um maior desenvolvimento no setor da energia encontra-se no continente asiático, mais precisamente a China. Por forma a garantir e melhorar a qualidade de energia elétrica, e evitar problemas nos sistemas de transmissão, constata-se já que em muitas aplicações do sistema elétrico Chinês se recorre à instalação de compensadores síncronos estáticos (*STATCOM*), como forma de garantir uma maior estabilidade de todo o sistema de transmissão. [31]

Após algum estudo sobre qual seria melhor subestação onde instalar o equipamento, e tendo em conta a idade e número de manobras dos equipamentos dessas mesmas subestações, decidiu-se instalar um *STATCOM* com uma potência de 200 MVAR, ligado a uma rede de 500 kV na subestação de Dongguan (Figura3) [31].

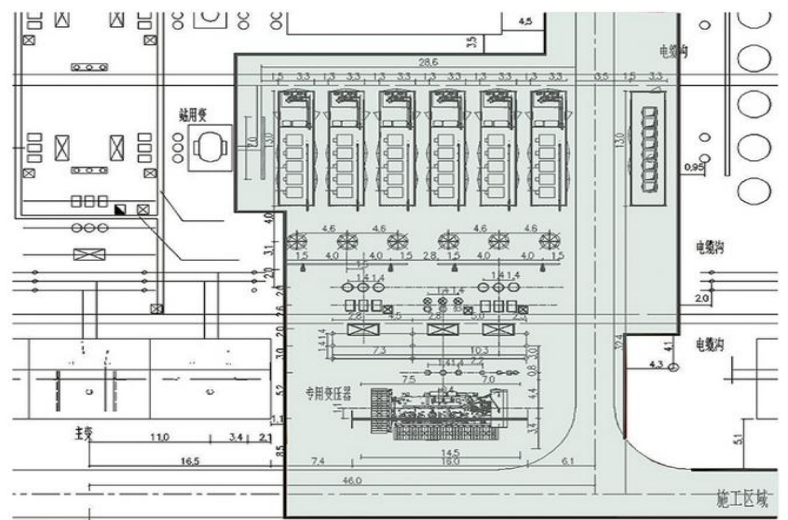


Figura 3 – *STATCOM* Instalado na Subestação de Dongguan [31]

2.4 Componentes do controlo do *STATCOM*

No dispositivo *STATCOM*, para injetar potência reativa, é necessário que exista um controle de sincronismo e um controle de amplitude de tensão [14].

De forma a sincronizar as tensões geradas pelo *STATCOM* e as tensões do Sistema/rede elétrica, recorre-se a um circuito de captura de fase, PLL-Phase Locked Loop.

Verifica-se que a potência reativa está relacionada com o ângulo de fase e as amplitudes das tensões geradas pelo *STATCOM*. Por sua vez, estas tensões geradas também estão relacionadas com a tensão no condensador CC que faz parte deste equipamento. Desta forma também é necessário controlar a tensão neste condensador de modo a controlar de forma eficaz a potência reativa gerada pelo *STATCOM* [14].

Na figura 4, apresenta-se um diagrama de controlo do dispositivo *STATCOM*, no qual estão visíveis os blocos principais do sistema de controlo.

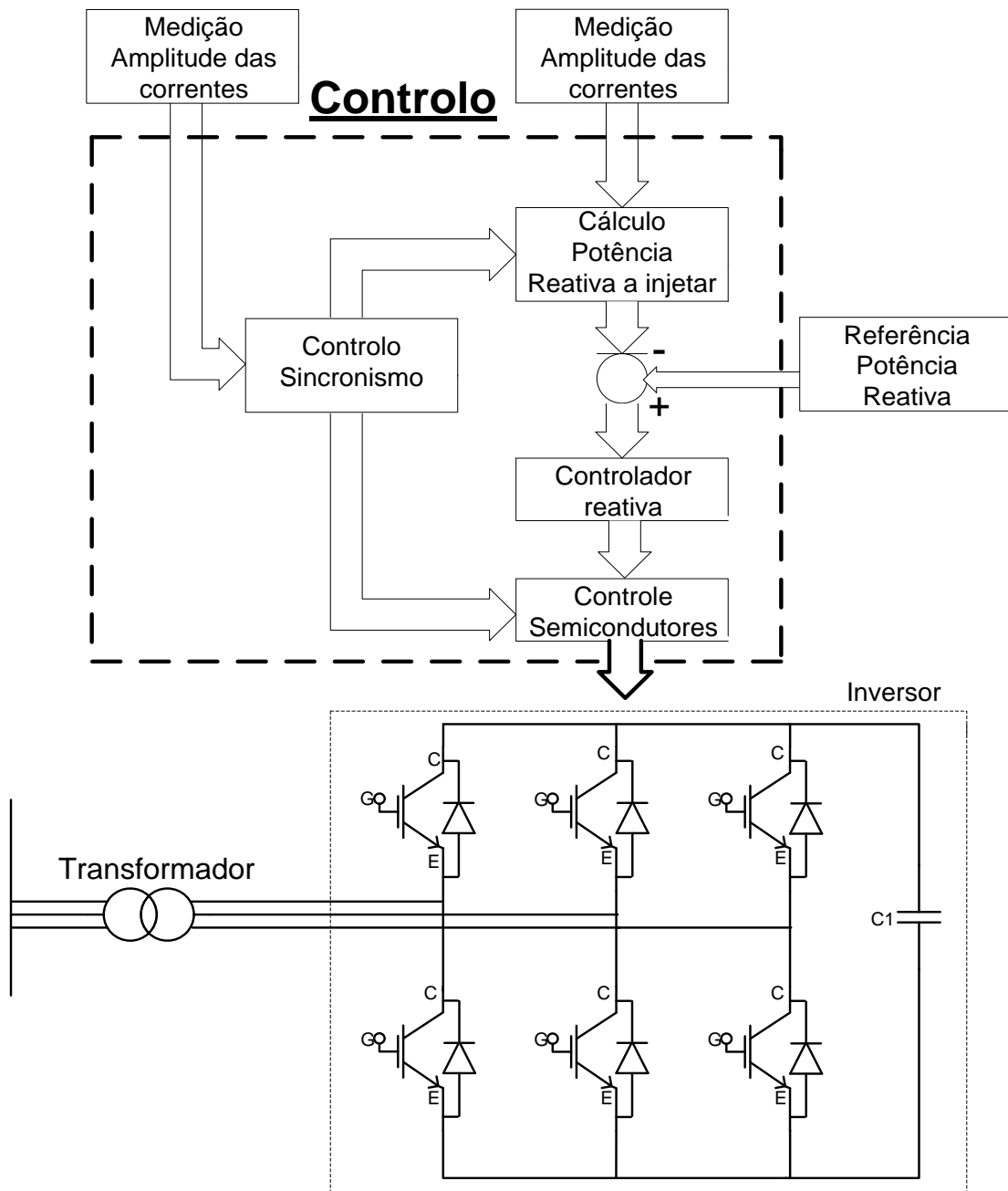


Figura 4 – Diagrama de blocos do *STATCOM* [14]

2.5 Ligação do STATCOM

Tipicamente o *STATCOM* encontra-se conectado à rede de alta tensão por intermédio de um transformador elevador (Figura 5). De fato, este transformador é utilizado para efetuar um aumento do nível da tensão de modo a se recorrer a semicondutores de potência que utilizem níveis mais baixos de tensão.

Por outro lado, o transformador também permite diminuir o conteúdo harmônico presente na forma de onda da corrente, retirando desta forma uma grande parte das harmônicas presente na forma de onda [3].

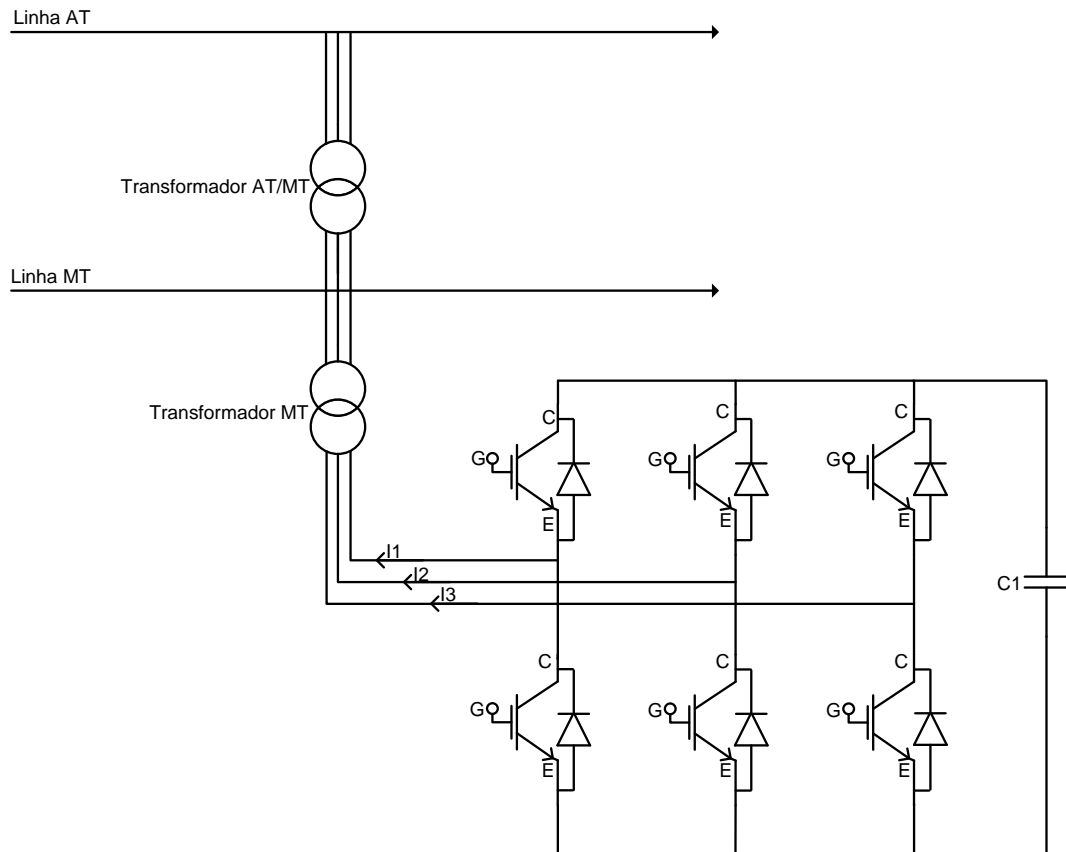


Figura 5 – Ligação *STATCOM* na Rede de Distribuição

2.6 Métodos de controlo do *STATCOM*

O *STATCOM* é um dispositivo no qual existe um inversor de tensão. Este inversor poderá ter muitas configurações, como por exemplo: inversor de ponte em H ou do tipo multinível (em cascata, como díodos fixos ao ponto neutro, condensadores flutuantes, etc.).

O compensador estático síncrono (*STATCOM*), é mutável pois permite fazer a compensação de uma determinada carga, compensar cavas de tensão e controlar a tensão num determinado barramento. De todos os controladores descritos na literatura, não existem controladores que permitam executar as três funções acima descritas em simultâneo, uma vez que normalmente realizam duas funções em simultâneo.

Uma grande parte dos sistemas de potência são analisados num sistema de coordenadas dq , uma vez que permite simplificar, o sistema a controlar, enquanto que perante um sistema trifásico caso se utilize o sistema de coordenadas abc , será mais complexo de analisar e controlar este sistema [3].

Consoante a aplicação do dispositivo *STATCOM*, existem vários métodos de controlo da corrente de saída.

Para compensação de carga foram propostos diversos controladores. Por exemplo em [3] é utilizado o controlador médio da corrente, onde é efetuada uma transformação de coordenadas de um sistema trifásico abc para um sistema de coordenadas dq , por forma a diminuir a complexidade do controlo [3].

Os sinais positivo e negativo do sinal de corrente são dados por forma a corresponder a sequência positiva e negativa dos sinais de retroação do controlador [3].

O controlador de sequência positiva segue a corrente de referência de comando e fornece o índice de modulação de sequência positiva (m_d^+ e m_q^+). Onde V_{sd} e V_{sq} são as coordenadas dq da sequência positiva da tensão [3].

O dispositivo *STATCOM* fornece a sequência negativa da corrente para a carga, de modo a que só a sequência positiva da corrente avance para a rede. Para compensar a sequência negativa da corrente será necessário, que a primeira referência da rede seja extraída da corrente da carga. É aplicada a transformação de abc para dq de modo a obter dq (I_{dnref} e I_{qnref}) da sequência negativa da corrente da carga [3].

Outro tipo de controlo, é o denominado controlo baseado no fasor, em que é efetuada uma transformação de Clark (abc para dq) ou utilização da técnica de minimização de Lagrange [3].

Com o propósito de obter uma compensação de cargas não equilibradas, existem vários controladores disponíveis. No entanto o dispositivo *STATCOM* também permite efetuar esta função, em que o sistema será controlado em coordenadas $\alpha\beta$ de modo a permitir uma regulação da tensão e compensação da carga [3].

O controlo de cada fase individual do sistema a controlar irá permitir um controlo da potência em cada uma das fases.

A modulação utilizada pelas mais variadas configurações também poderá ser escolhida consoante a aplicação. Assim poderá ser utilizada a modulação por largura de impulsos sinusoidal (*SPWM*), que tem como grande vantagem a sua simplicidade, frequência de comutação fixa e o fato de manter o conteúdo harmónico baixo.

Existe também a modulação por largura de impulsos sinusoidal com eliminação seletiva das harmónicas (*SHEPWM*). A vantagem deste tipo de modulador, é que irá permitir uma eliminação das harmónicas de ordem baixa. Por outro lado, nesta modulação será aplicada a frequência correta de comutação dos semicondutores, o que permitirá manter o conteúdo harmónico abaixo do que se encontra especificado como limite pela norma IEEE Standard 519 [3].

2.7 Dispositivo STATCOM aplicados aos parques eólicos.

Por forma a garantir que todos os requisitos exigidos por parte do regulador da rede elétrica de um determinado país são satisfeitos é necessário garantir que todas as grandezas elétricas estão de acordo com esses mesmos requisitos. Neste contexto é muito frequente utilizar o dispositivo *STATCOM* junto aos sistemas elétricos que se encontram na proximidade de parques eólicos, por forma a compensar uma eventual falha de uma turbina eólica [28].

Muitas das turbinas eólicas mais recentes já vêm equipadas com tecnologia que permite garantir que todas as grandezas elétricas à saída do gerador se encontram na especificação de *set-point*, e no caso de haver desvio deslastram num período muito curto de tempo. No entanto constata-se que em alguns parques eólicos existem turbinas eólicas que quando foram construídas não se encontravam providas de tecnologia, que permitisse controlar com a precisão atual os transitórios de uma dada grandeza elétrica [28].

Atualmente cerca de 30% da potência eólica instalada continua a utilizar máquinas de indução com rotor em gaiola de esquilo, que se encontram diretamente ligados a rede, e são de velocidade fixa [29].

A grande vantagem de ainda se utilizar este tipo de equipamento reside no facto desta apresentar uma baixa manutenção, custo baixo e serem equipamentos muito robustos e de fácil construção.

No entanto tem como desvantagem o facto de se encontrar diretamente ligado à rede, não contribuindo para uma regulação mais efetiva de regulação de potência, pelo que é necessário recorrer a um suporte de potência de reativa [29].

Os geradores de indução com rotor em gaiola de esquilo, após uma falha consomem potência reativa e diminuem a velocidade, pelo que isto poderá provocar uma grande instabilidade na tensão e na velocidade do rotor [29].

No momento em que se verifica uma falha a máquina irá embalar devido ao facto de existir uma grande discrepância entre a potência mecânica no veio da turbina e a potência elétrica a entregar a rede. Após a falha a máquina irá consumir muita potência reativa, impedindo a estabilização da tensão [29].

Constata-se que quando a tensão não atinge o valor nominal de uma forma rápida o gerador irá continuar a aumentar a sua velocidade e irá consumir cada vez mais energia reativa, pelo que isto poderá levar a uma destabilização da tensão e na velocidade do rotor [29].

Por forma a solucionar os problemas que anteriormente foram apontados, é muito frequente recorrer à utilização de dispositivos *STATCOM* aplicados à rede elétrica de um parque eólico [29].

2.8 Compensação da potência reativa associado à cogeração

O dispositivo *STATCOM*, quando aplicado ao ciclo de cogeração irá permitir nos casos em que se verifique falhas/cavas de tensão na rede de distribuição, uma maior e melhor continuidade de serviço mantendo a instalação a funcionar isolada da rede evitando assim que as cargas se deslastrem [27].

É importante numa instalação de cogeração, verificar sempre o funcionamento das proteções de sobretensão e subtensão que se encontram a monitorizar a tensão da rede elétrica, isto para que quando se verificar uma falha na rede isolar toda a instalação de forma a evitar danos mais severos para esta [27].

Muitas vezes nos sistemas de cogeração apesar de todas as vantagens do ponto de vista técnico não se implementa estes equipamentos, isto devido muitas vezes ao custo de

projeto e implementação do dispositivo, que tem que ser suportado pelo explorador/proprietário da instalação.

Num sistema de cogeração que utilize um nível de tensão de cerca de 1kV até 10 kV é possível realizar a instalação direta de um *STATCOM* neste barramento que tem o intervalo de tensão nominal anteriormente referido, evitando desta forma a colocação de um transformador redutor para efetuar um abaixamento da tensão, para colocar em funcionamento toda a eletrónica de potência do *STATCOM* [3].

Um dos piores defeitos em regimes transitórios que poderá ocorrer num sistema elétrico com cogeração é quando se tem uma falha de muito pouco tempo do fornecedor de energia elétrica [27].

Em unidades industriais, que tem ciclos de cogeração implementados, existem normalmente cargas dinâmicas que necessitam de muita potência reativa, no instante e após o desaparecimento do defeito [27].

Num sistema elétrico de uma cogeração, caso se compare a resposta transitória de um *SVC* e de *STATCOM*, durante uma desconexão ou falha da rede elétrica, verifica-se que o *STATCOM* é quem apresenta uma compensação mais rápida, e uma regulação mais efetiva da potência reativa, quando se está perante uma tensão muito baixa [27].

O exemplo de um estudo onde se analisou a influência de compensar a energia reativa através de um *SVC*, numa subestação que alimenta uma unidade fabril com cogeração é descrito em [32]. A nave industrial em questão é uma das maiores fábricas de produção de alumínio e alumina do mundo, que se encontra no Brasil, mais precisamente a ALUMAR- Consorcio de Alumínios do Maranhão que em termos de potência elétrica tem uma necessidade total de 825MW.

Neste estudo foi efetuada a modelação de todo o sistema elétrico para se poder verificar qual seria o comportamento deste com o introdução de um compensador de potência reativa [32].

Neste caso recorreu-se a uma tecnologia já amplamente testada, nomeadamente o dispositivo *Static Var Compensator (SVC)*.

O *SVC* foi desenvolvido no início dos anos 70 para aplicações industriais para permitir corrigir o *flicker* (tremulação), melhorar a estabilidade transitória, e prevenir

abaixamentos de tensão que não garantam a continuidade de serviço de uma dada instalação elétrica [32].

Este equipamento foi instalado na subestação que fornece a energia para toda a unidade fabril, com o propósito de melhorar o fornecimento de energia elétrica, pois verifica-se que as duas linhas ($U_n = 230 \text{ kV}$) que alimentam toda a Ilha de São Luís e a unidade fabril encontram-se sobrecarregadas, verificando-se em muitos casos problemas na estabilidade da tensão.

A Subestação São Luís II que alimenta a ALUMAR e a capital do Maranhão, recebe duas linhas de 500 kV e depois na subestação é efetuado a transformação para 230 kV. Os maiores problemas verificam-se quando os receptores das linhas de 230 kV se encontram em plena carga e se constata uma falha numa das duas linhas (de 500 kV) que alimentam a subestação, provocando oscilações consideráveis nas grandezas elétricas.

Uma das imposições do distribuidor quando se verifica uma falha deste tipo é que o maior consumidor neste caso a fábrica da ALUMAR, reduza a sua carga de 825 MW para 790 MW, por forma a minimizar as perturbações no sistema elétrico. A redução da carga pela nave industrial irá trazer repercussões negativas no processo fabril em si. Para colmatar esta situação foi projetado e instalado um SVC no barramento dos 230 kV em Setembro de 2007.

O SVC instalado tem potência de -100 a + 150 MVAR, e encontra-se ligado no barramento dos 230 kV por intermédio de um transformador elevador, de 150 MVA.

Recorre-se a um transformador elevador pois o SVC instalado opera com uma tensão nominal de 18,3 kV.

Apresenta-se na figura 6 o diagrama unifilar do SVC instalado na subestação de São Luís, sendo o controle de tensão realizado através de um controlador em cadeia fechada. O valor de susceptância a compensar é definido pelo controlador que depois através da combinação do TCR e do TSC, irá obter o valor correto de compensação. Os filtros FH-5 e FH-7, encontram-se instalados por forma a absorver o conteúdo harmónico gerado pelo TCR [32].

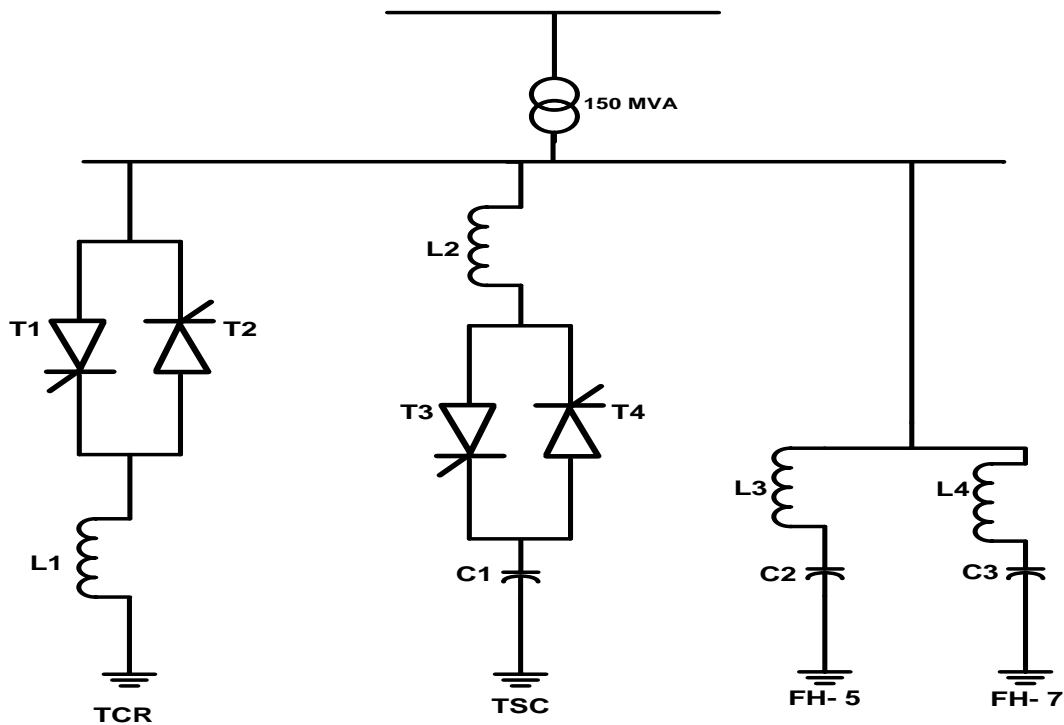


Figura 6 – Diagrama unifilar do SVC instalado na subestação São Luís II [32]

O funcionamento de um compensador de reativa estático (SVC) poderá ser descrito como um circuito equivalente composto por um condensador e uma bobine em paralelo, em que basicamente poderá ser alterado o valor de cada um dos componentes de modo a ajustar a tensão e a potência reativa num determinado ponto de uma instalação.

No dispositivo SVC os condensadores podem ser fixos, ou semicomandados através do *TSC-Thyristor Switched Capacitor* (figura 8), permitindo assim compensação constante ou variação discreta da potência reativa. De igual modo as reatâncias, podem ser também fixas ou semicomandadas através do *TSR-Thyristor Switched Reactor*.

Porém um dos elementos mais importantes do SVC é o *TCR - Thyristor Controlled Reactor* (figura 7), que irá controlar o ângulo de disparo dos tirístores de forma a se obter o controle da potência reativa [32].

Em termos de funcionamento do *TCR*, constata-se que a corrente na bobine poderá ser controlada desde zero até um valor máximo controlando o ângulo de disparo do tiristor. Quando estamos perante um ângulo α entre 0° e 90° a condução do semicondutor é parcial e a corrente no *TCR* reduz-se com o aumento do ângulo de disparo, ou seja irá diminuir a reactância efetiva do *TCR*, reduzindo a corrente e a potência reativa absorvida [32].

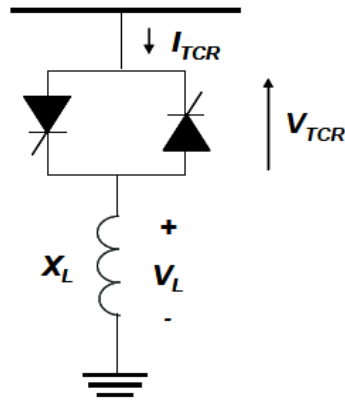


Figura 7 – Elementos constituintes de um TCR [32]

O TSC (figura 8) é composto por bancos de condensadores devidamente separados, em que a entrada ou retirada de serviço dos bancos de condensadores é efetuada recorrendo a tirístores. Constata-se que no TSC os condensadores ou se encontram totalmente inseridos no sistema ou se encontram fora dele, não permitindo uma variação contínua da reactância capacitiva. No entanto uma das soluções adotadas é o recurso à utilização de vários bancos de condensadores colocados em paralelo, no qual irá entrar em serviço os bancos que se verificarem que são necessário para compensar o sistema de potência em questão.

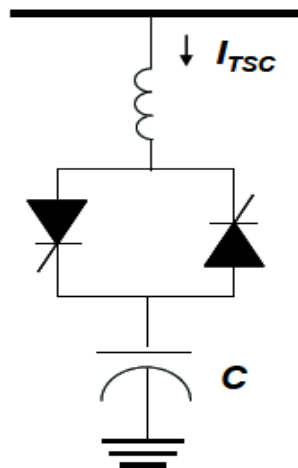


Figura 8 – Elementos constituintes de um TSC [32]

O SVC (*Static VAR Compensator*), é um dispositivo composto por reactâncias e condensadores ligados em paralelo, que conectado juntamente com transformadores e com o auxílio de semicondutores, formam um sistema de compensação de potência reativa, que irá permitir controlar a tensão num dado barramento [32].

Na figura 9 apresenta-se um esquema unifilar e equivalente do SVC.

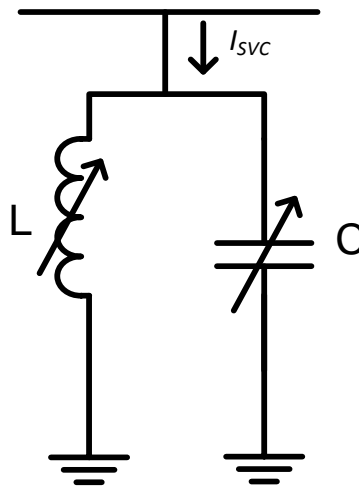


Figura 9 – Representação de um SVC [32]

Apresenta-se na figura 10 a curva característica de tensão/corrente do SVC. O máximo da potência reativa com caráter capacitivo é obtido no momento de bloqueio do TCR em que se tem um ângulo de disparo α de 90° . Ao reduzir-se o ângulo de disparo, a corrente no TCR aumenta, reduzindo desta forma a potência reativa com caráter capacitivo no SVC. Com um ângulo α de 0° o TCR irá conduzir todo o semi-ciclo obtendo assim a máxima potência reativa de caráter indutivo.

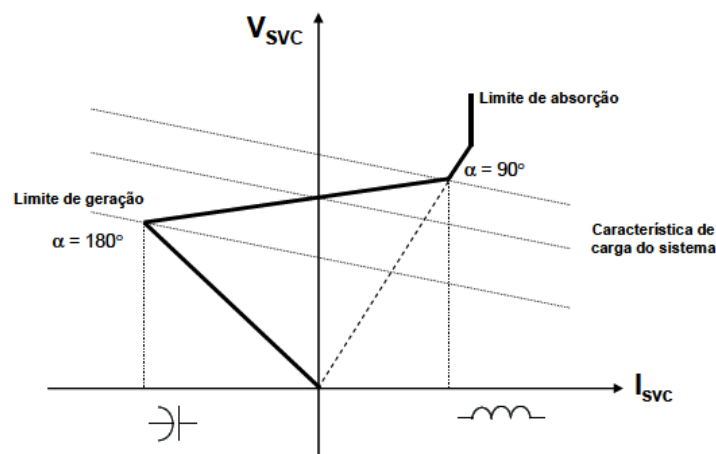


Figura 10 – Curva Característica Tensão/Corrente do SVC [32]

2.9 Controlo da Potência Reativa

Uma das premissas mais importante no dimensionamento do *STATCOM* é a necessidade de controlar com rigor a potência reativa (indutiva ou capacitiva) que é injetada no barramento/rede elétrica. Para isso é necessário ter em atenção que quando a amplitude da tensão no barramento é superior a tensão do *STATCOM*, este funciona como um banco de potência reativa indutiva. Quando se constata que a tensão no barramento é inferior à tensão do *STATCOM*, este funciona como um banco de potência reativa de caráter capacitivo.

Verifica-se que sempre que houver desfasagem entre a tensão do barramento e a tensão do *STATCOM* existe fluxo de potência ativa.

Na situação em que as tensões do barramento, estão em avanço em relação à tensão do *STATCOM*, existe um fluxo de potência ativa para este, aumentando a tensão no barramento CC.

No caso que as tensões no barramento estão atrasadas em relação a tensão do *STATCOM*, irá existir um fluxo de potência ativa para o barramento, diminuindo desta forma a tensão no barramento CC do *STATCOM*.

Verifica-se então que para o controle de reativa é necessário estar constantemente a monitorizar as tensões na rede e as tensões no *STATCOM*, de forma a verificar quais são as desfasagens entre as duas tensões e alterando a tensão no barramento CC do compensador.

Conclui-se então que controlando a tensão no barramento CC do *STATCOM*, é possível controlar a amplitude da tensão CA do *STATCOM*. [14]

Apresenta-se de seguida a equação 1 que é utilizada para relacionar a potência reativa a colocar no sistema elétrico consoante as características do mesmo e os valores de referência a colocar no sistema a compensar. [1]

$$Q = \frac{V_{STATCOM} - V_s}{X} \times V_s \quad [1] \quad (1)$$

Onde $V_{STATCOM}$ é a tensão de saída do *STATCOM*, V_s é a tensão do sistema, X é impedância equivalente entre o *STATCOM* e o sistema a compensar e Q é a potência reativa.

Capítulo 3

Sistema de compensação *STATCOM*

3.1 Princípios de operação do dispositivo *STATCOM*

O diagrama simplificado do sistema de potência do dispositivo *STATCOM*, poderá ser representado, por uma reactância XL , uma fonte equivalente e o inversor. Na figura 11 apresenta-se o esquema simplificado de um sistema de potência do dispositivo *STATCOM*, onde se constata que o fasor V_s , representa a tensão na fonte equivalente, V_L a tensão na reactância, e V_I a tensão gerada pelo *STATCOM* [37].

As potências ativa e reativa aos terminais do *STATCOM* podem ser escritas da seguinte forma:

Potência ativa,

$$P = \frac{V_s \times V_I}{X_L} \times \sin \delta \quad (2)$$

Potência reativa,

$$Q = \frac{V_s}{X_L} [V_s - V_I \cos \delta] \quad (3)$$

Onde δ representa a defasagem entre as tensões V_s e V_I

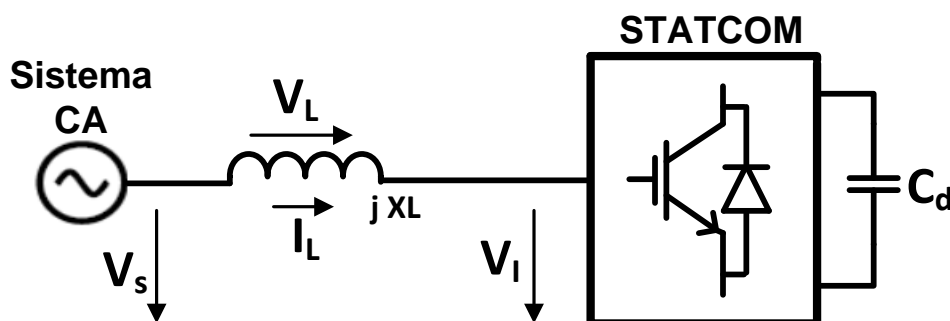


Figura 11 – Esquema simplificado de um sistema de potência [37]

Analisando a figura 12 a), verifica-se que potência é zero quando as tensões V_s e V_I são iguais em amplitude e a corrente I_L também é zero [37].

A potência reativa nos terminais do dispositivo *STATCOM* é positiva quando a amplitude da tensão V_s for maior do que a amplitude de V_I . Através da análise da figura 12 b), constata-se que a corrente I_L se encontra em quadratura e atraso da tensão V_s [37].

Ir-se-á verificar geração de potência reativa nos terminais do *STATCOM*, quando a amplitude da tensão V_I for maior do que a amplitude tensão V_s . Nesta situação a corrente de linha (I_L) fica atrasada da tensão V_s , sendo este fato constatado pela análise da figura 12 c). Na análise das três situações assinaladas as tensões V_s e V_I estão em fase, ou seja o ângulo δ é zero [37].

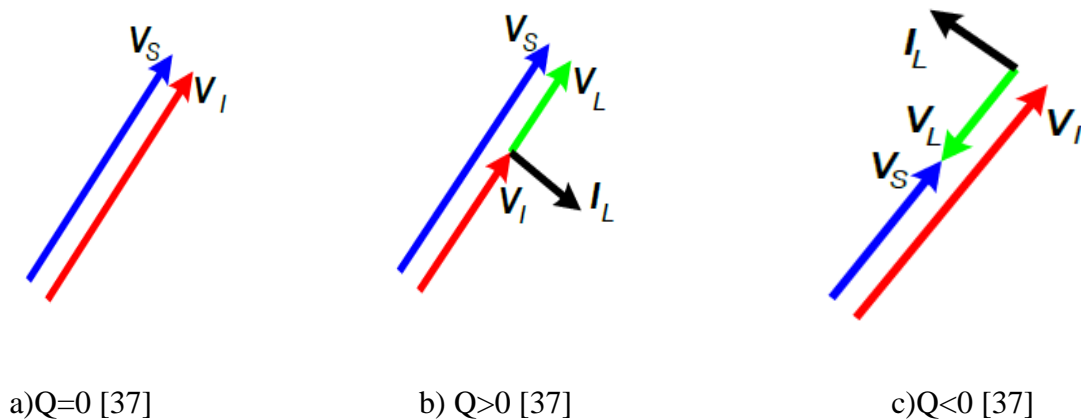


Figura 12- diagrama vetorial das tensões e correntes

Após a análise das figuras 12 a), 12 b) e 12 c) constata-se que para obter um controle da potência reativa no dispositivo *STATCOM*, é fundamental controlar em amplitude e ângulo de fase da tensão V_I [37].

Para obter um controle efetivo da tensão no condensador (Condensador C_d , figura 11), é necessário controlar a potência ativa. Esta potência também será controlada através da amplitude e ângulo de fase da tensão alternada aos terminais do conversor [37].

Apresenta-se de na Figura 13 o diagrama fasorial, onde se constata que a tensão V_s se encontra em avanço da tensão V_I , o ângulo de defasagem é positivo ($\delta > 0$) e a corrente

I_L encontra-se em fase com a tensão V_S . Com estas condições é possível carregar o condensador do dispositivo *STATCOM* [37].

Por outro lado, para que a tensão no barramento CC do dispositivo *STATCOM* baixe, o condensador deverá descarregar-se. Pela análise do diagrama fasorial (Figura 14) verifica-se que nesta a tensão V_S se encontra em atraso da tensão V_I , o ângulo de defasagem é negativo ($\delta < 0$) e a tensão V_S fica desfasada da corrente da linha (I_L) [37].

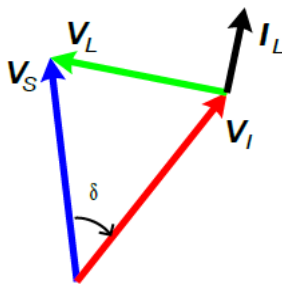


Figura 13 – Aumento tensão CC [37]

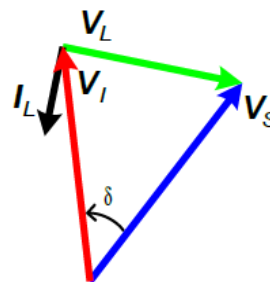


Figura 14 – Diminuição tensão CC [37]

3.2 Topologia adotada

Para o *STATCOM* utilizado adotou-se a topologia do inversor trifásico em ponte (Figura 15). Esta topologia é das mais utilizadas, utilizando seis semicondutores de potência [14].

O controle do inversor será efetuado recorrendo a técnica de modulação por largura de impulsos *PWM* (*Pulse Width Modulation*), tendo em consideração a sua facilidade de implementação e minimização das harmónicas da tensão [14].

3.3 Modelação do sistema

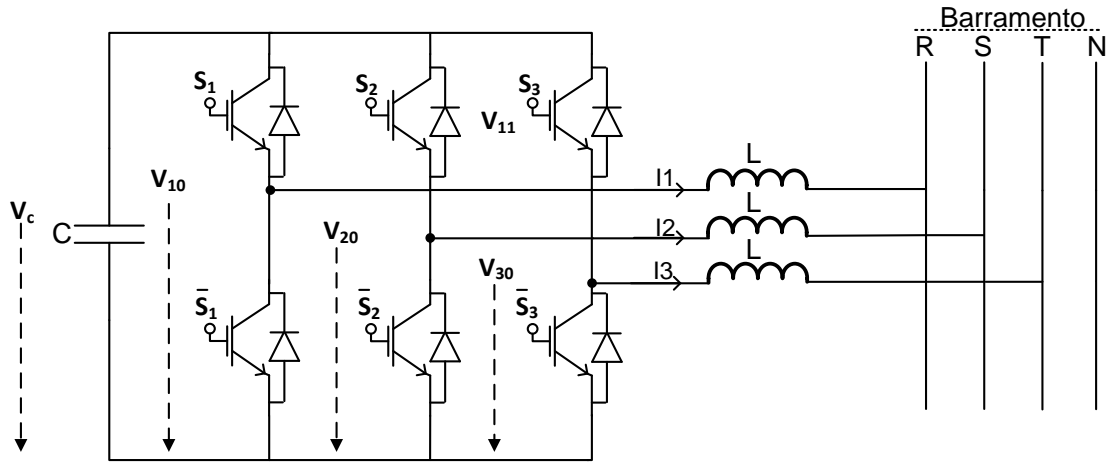


Figura 15 – Estrutura inversor para análise

Para efeitos da modulação do conversor, os semicondutores de potência representados na figura 15, poderão ser representados por uma variável γ_i , em que $i \in \{1,2,3\}$, e o conjunto de semicondutores representado por S_i tendo em conta a seguinte expressão:

$$\gamma_i = \begin{cases} 1 & \text{se } S_i \text{ se encontra à condução e } \bar{S}_i \text{ está ao corte} \\ 0 & \text{se } S_i \text{ está ao corte e } \bar{S}_i \text{ se encontra à condução} \end{cases} \quad (4)$$

Efetuada uma análise do circuito da figura 15, o sistema de equações das tensões simples da saída do inversor poderá ser expresso pela seguinte forma:

$$\begin{cases} V_{1N} = \frac{1}{3}(2V_{10} - V_{20} - V_{30}) \\ V_{2N} = \frac{1}{3}(-V_{10} + 2V_{20} - V_{30}) \\ V_{3N} = \frac{1}{3}(-V_{10} - V_{20} + 2V_{30}) \end{cases} \quad (5)$$

A partir do sistema de equações é possível desenvolver o seguinte sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{1N} \\ V_{2N} \\ V_{3N} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \end{bmatrix} \quad (6)$$

As tensões nos pontos médios de saída dos braços do conversor enunciados no sistema anterior, poderá ser expressa em função das funções de comando através da seguinte equação, onde V_C representa a tensão aos terminais do condensador:

$$\{ V_{j0} = \gamma_j V_C, \text{ onde } j = \{1,2,3\} \} \quad (7)$$

A partir do sistema matricial descrito em (6) e ao aplicar o sistema de equações (7), obtém-se o seguinte sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{1N} \\ V_{2N} \\ V_{3N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\gamma_{10} & -\frac{1}{3}\gamma_{20} & -\frac{1}{3}\gamma_{30} \\ -\frac{1}{3}\gamma_{10} & \frac{2}{3}\gamma_{20} & -\frac{1}{3}\gamma_{30} \\ -\frac{1}{3}\gamma_{10} & -\frac{1}{3}\gamma_{20} & \frac{2}{3}\gamma_{30} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_C \\ V_C \\ V_C \end{bmatrix} \quad (8)$$

Agregando as variáveis de comutação obtém-se o sistema (9):

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}V_C & -\frac{1}{3}V_C & -\frac{1}{3}V_C \\ -\frac{1}{3}V_C & \frac{2}{3}V_C & -\frac{1}{3}V_C \\ -\frac{1}{3}V_C & -\frac{1}{3}V_C & \frac{2}{3}V_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \gamma_{30} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Por forma a simplificar os sistemas trifásicos equilibrados, recorre-se à transformação de Clarke-Concordia onde é efetuada uma transformação de um sistema trifásico de coordenadas $X_{a,b,c}$, para um sistema bifásico $X_{\alpha,\beta}$, tal como expresso em (10) e (11).

$$X_{a,b,c} = M X_{\alpha,\beta} \quad (10)$$

$$X_{\alpha,\beta} = M^T X_{a,b,c} \quad (11)$$

A M é a matriz de transformação de Clarke-Concordia:

$$M = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para se obter a transformada inversa (13), aplica-se a matriz ortogonal M^T :

$$M^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Aplicando a matriz ortogonal obtida em (13) obtém-se $V_{\alpha,\beta}$ a partir de $V_{a,b,c}$:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ao efetuar a substituição do sistema (9) em (14), obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} V_c & -\frac{1}{6} V_c & -\frac{1}{\sqrt{6}} V_c \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} V_c & -\frac{1}{\sqrt{2}} V_c \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Admitindo que o sistema não tem o neutro obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} V_c & -\frac{1}{6} V_c & -\frac{1}{\sqrt{6}} V_c \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} V_c & -\frac{1}{\sqrt{2}} V_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.4 Controlo do sistema

O controlo a desenvolver para este sistema irá permitir um controlo da potência reativa, assim como a regulação e estabilidade da tensão. É realizada toda a sincronização dos disparos para os semicondutores do inversor, assim como a regulação da tensão contínua (barramento CC), de forma a efetivar o controle de potência reativa. É necessário efetuar todo um controle de sincronismo e controlar a amplitude da tensão.

O controlo da tensão no condensador é efetuada pelo sistema de controlo do *STATCOM*. A carga dos condensador é efetuada pelo conversor eletrónico que irá se comportar como retificador ou inversor controlado [14].

3.4.1 Controlo das potências

Para o controlo das potências irá recorrer-se às expressões que definem as grandezas elétricas nomeadamente as tensões e correntes trifásicas [38]. Assim considerando as tensões simples e correntes de fase definidas por:

$$\begin{cases} V_{S1} = \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) \\ V_{S2} = \sqrt{2} V_s \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{S3} = \sqrt{2} V_s \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} I_1 = \sqrt{2} I \sin(\omega t) \\ I_2 = \sqrt{2} I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_i\right) \\ I_3 = \sqrt{2} I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi_i\right) \end{cases} \quad (18)$$

A potência trifásica ativa será dada pela seguinte equação:

$$P = V_{S1}I_1 + V_{S2}I_2 + V_{S3}I_3 \quad (19)$$

Ao aplicar a transformação de Clarke-Concordia (12) (13), e considerando a componente homopolar da tensão e da corrente de valor nulo $V_{S0} = 0$ e $i_0 = 0$ obtém-se a mesma expressão mas em coordenadas $\alpha\beta$ [38].

Através do vetor da potência complexa que é dado por:

$$\bar{S} = P + jQ \leftrightarrow \bar{S} = \bar{U} \times \bar{I}^* \quad (20)$$

E aplicando ao caso em estudo obtém-se:

$$\begin{cases} \bar{U} \Rightarrow \bar{V}_s = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} \\ \bar{I}^* \Rightarrow \bar{I}^* = i_{s\alpha} + ji_{s\beta} \end{cases} \quad (21)$$

Substituindo na expressão (20) da potência complexa tem-se:

$$S = (V_{s\alpha}I_{s\alpha} + V_{s\beta}I_{s\beta}) + j(V_{s\alpha}I_{s\beta} - V_{s\beta}I_{s\alpha}) \quad (22)$$

A mesma expressão obtida anteriormente (22) poderá ser definida em matriz:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & -V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Ao efetuar a aplicação da transformação de Park obtém-se as potências mas em coordenadas dq (24):

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd} & V_{sq} \\ V_{sq} & -V_{sd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} \quad (24)$$

Considera-se que o sistema referencial está sincronizado com a rede, de forma a que $V_{sq} = 0$, logo as potências ativa e reativa são dadas por:

$$P = V_{sd}id \quad (25)$$

$$Q = -V_{sq}iq \quad (26)$$

Os valores de referência das correntes podem então ser determinados, tendo por base os valores da potência ativa P^* e reativa Q^*

$$I_d^* = \frac{P^*}{V_{sd}} \quad (27)$$

$$I_q^* = -\frac{Q^*}{V_{sq}} \quad (28)$$

A estratégia deve passar pelo controlo das correntes id e iq , por forma a se obter uma convergências para as suas referencias I_d^* e I_q^* [38].

3.4.2 Controlo de correntes (Controlador por banda de histerese)

Para o controlo das correntes de saída do *STATCOM*, foi adotado um controlador por banda de histerese. Neste controlador a comutação dos semicondutores é efetuada de forma independente, com base na comparação do valor medido da corrente na saída do conversor com os valores limites permitidos pelo controlo do equipamento.

Os limites superior e inferior da banda de histerese são dados por:

$$\begin{cases} \text{Limite superior} = i * ck + \Delta(1 + \varepsilon) \\ \text{Limite inferior} = i * ck - \Delta(1 - \varepsilon) \end{cases} \quad (29)$$

Em que Δ corresponde a metade da largura de banda e $i*ck$ ($k=a,b,c$).

3.4.3 Controlo de tensão

Existe a necessidade de manter uma regulação da tensão, no barramento CC, do *STATCOM*, isto para se obter as tensões corretas de forma a não ultrapassar os limites de operação do condensador. As principais causas de variação de tensão no condensador estão relacionadas com os seguintes fatores: perdas que se verificam na comutação dos semicondutores, compensação da parcela oscilante da potência ativa da carga [37].

Na figura 16, encontra-se representado o circuito equivalente do conversor em coordenadas dq . Através da análise do mesmo é possível retirar as expressões que definem a dinâmica da tensão do condensador.

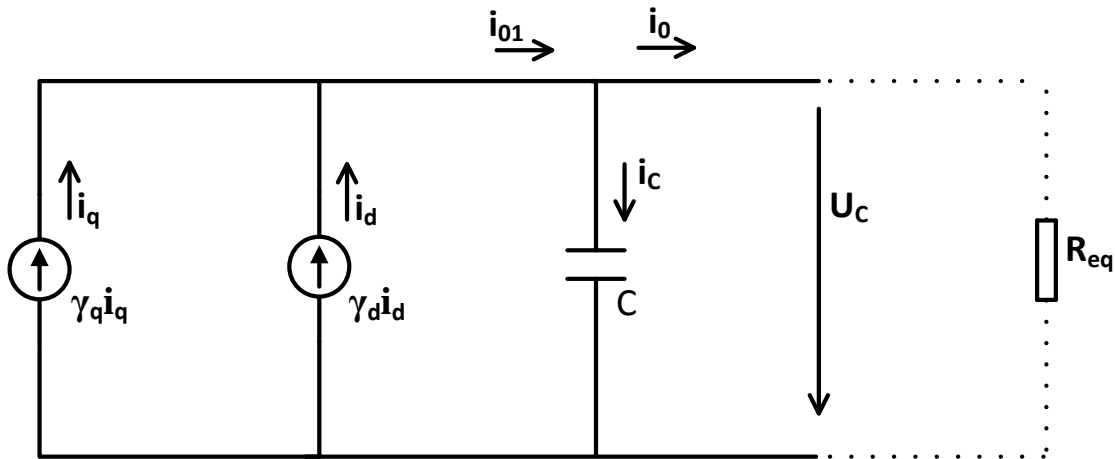


Figura 16 – Circuito equivalente do conversor em coordenadas dq [43]

Analisando o circuito apresentado na figura 16, obtém-se a seguinte expressão:

$$i_c = i_{01} - i_0 \quad (30)$$

A variação da tensão aos terminais do condensador poderá ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{\gamma_1}{C} i_1 + \frac{\gamma_2}{C} i_2 + \frac{\gamma_3}{C} i_3 - \frac{1}{C} i_0 \quad (31)$$

Por forma a transformar a expressão anterior para o sistemas de coordenadas dq , irá ser aplicada a transformação de Clark-Concordia (tal como já aplicada no subcapítulo 3.3), onde se obtém a seguinte equação:

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{\gamma_d}{C} i_d + \frac{\gamma_q}{C} i_q - \frac{1}{C} i_0 \quad (32)$$

A resistência R_{eq} , representada na figura 16, caracteriza a resistência equivalente, sendo a corrente i_0 dada por:

$$i_0 = \frac{U_c}{R_{eq}} \quad (33)$$

Substituindo a expressão (32) e aplicando a transformada de Laplace, obtém-se a seguinte função de transferência da tensão para o condensador e para a resistência:

$$sV_c(s) = \frac{\gamma_d}{C} i_d + \frac{\gamma_q}{C} i_q - \frac{U_c(s)}{R_{eq}C} \leftrightarrow V_c(s) = \frac{R_{eq}}{sR_{eq}C+1} (\gamma_d i_d + \gamma_q i_q) \quad (34)$$

Com o intuito de se analisar os atrasos no controlo, recorre-se a uma função com atraso temporal:

$$f(t - T_D) \rightarrow F(s)e^{-sT_D} \quad (35)$$

A função de transferência das correntes i_d e i_q são então dadas por:

$$\frac{i_d(s)}{i_d^*(s)} = \frac{\gamma_d}{1+sT_D} \quad (36)$$

$$\frac{i_q(s)}{i_q^*(s)} = \frac{\gamma_q}{1+sT_D} \quad (37)$$

Ao substituir as expressões (36) e (37) em (34) obtém-se a expressão (38).

$$V_c(s) = \frac{R_{eq}}{sR_{eq}C+1} \left(\frac{\gamma_d}{1+sT_D} i_d^* + \frac{\gamma_q}{1+sT_D} i_q^* \right) \quad (38)$$

Através da figura 17 é possível verificar o diagrama de blocos do sistema de controlo da tensão no condensador. Incluiu-se um compensador $C(s)$ e uma retroação de forma a garantir que todo o sistema opera em cadeia fechada.

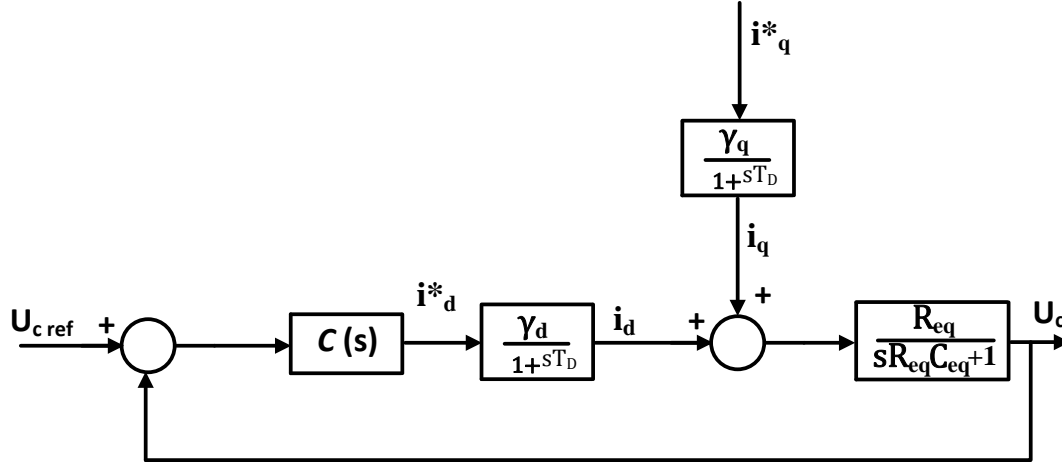


Figura 17 – Circuito equivalente do conversor em coordenadas dq [43]

A função de transferência do sistema será dada por (39) em que $C(s)$ é igual a K_p considerando a utilização de um controlador proporcional.

$$\frac{U_c(s)}{U_{cref}(s)} = \frac{\frac{k_p \gamma_d}{C T_D}}{s^2 + s \left(\frac{R_{eq} C + T_D}{R_{eq} C T_D} \right) + \left(\frac{R_{eq} k_p \gamma_d + 1}{R_{eq} C T_D} \right)} \quad (39)$$

Na situação de se utilizar apenas um controlador integral $C(s) = \frac{K_I}{s}$, o erro estático anulava-se, no entanto a resposta do sistema seria lenta, isto porque o pólo dominante estaria localizado muito perto da origem [43].

Por forma a obter um controlo eficaz recorre-se a utilização de um controlador PI, que é dado pela expressão:

$$C(s) = \frac{k_I \left(\frac{k_p}{k_I} s + 1 \right)}{s} \quad (40)$$

Com o pólo dominante $\left(-\frac{1}{R_{eq}C}\right)$ do sistema (calculado com o zero do controlador) e com a utilização de um controlador PI obtém-se a seguinte função de transferência:

$$\frac{U_c(s)}{U_{cref}(s)} = \frac{\frac{k_I \gamma_d R_{eq}}{T_D}}{s^2 + s\left(\frac{1}{T_D}\right) + \left(\frac{k_I \gamma_d R_{eq}}{T_D}\right)} \quad (41)$$

Se considerarmos uma equação (tipo) da função de transferência de um sistema de 2ª ordem (equação 42), e compararmos com a função de transferência obtida em (41), obtém-se a frequência angular das oscilações amortecidas ω_n , o coeficiente de amortecimento ξ , e o ganho proporcional (k_P) e integral(k_I), como se poderá constatar na equação (43) [43].

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_n^2 = \frac{k_I \gamma_d R_{eq}}{T_D} \Rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{k_I \gamma_d R_{eq}}{T_D}} \\ 2\xi\omega_n = \frac{1}{T_D} \Rightarrow \xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{k_I \gamma_d R_{eq} T_D}} \\ R_{eq}C = \frac{k_P}{k_I} \end{array} \right. \quad (43)$$

3.4.4 PLL – Phase Locked Loop

Os circuitos de captura de fase, designados no trabalho como *Phase Locked Loop-PLL*, são utilizados para sincronizar sinais. No caso do *PLL* aplicados aos *STATCOM* estes têm como principal função efetuar a deteção da fase dos sinais de sequência positiva, mesmo que estes sinais tenham conteúdo harmónico e estejam misturados com sinais de sequência negativa [15].

Neste trabalho adotou-se um circuito *PLL* baseado no detetor de sequência positiva a partir da teoria *p-q* [33]. Através do detetor de sequência positiva baseado na teoria *p-q* (teoria da potência real e imaginária), e com o objetivo de se obter correntes sinusoidais, na fonte é necessário possuir a tensão fundamental de sequência positiva do sistema. O detetor de sequência positiva baseado na teoria *p-q* é adequado para determinar a componente V_{+1} através da implementação de um circuito *PLL*, este circuito será também implementado no método de controlo de referência de corrente da teoria *p-q-r* [33].

O circuito *PLL* permite em regime permanente, determinar a fase e a frequência da componente fundamental de sequência positiva das tensões do sistema. As tensões de entrada do circuito são v_{ab} e v_{cb} , tendo por base a equação de potência trifásica instantânea (44) (atenção que a potência é fictícia assim como as correntes i_a e i_c) nas coordenadas a,b,c [33].

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \Leftrightarrow p_{3\phi} = v_{ab} i_a + v_{cb} i_c \quad (44)$$

Com o pressuposto que:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (45)$$

Com um controlador PI e estando em regime permanente, verifica-se que não existe erro do estado estacionário, ou seja $\bar{p}_{3\phi} = 0$. Nesta situação verifica-se que as correntes fictícias i_a e i_c se encontram em quadratura (90°) e avanço das respetivas tensões. Constata-se neste caso que existe apenas potência imaginária. Por fim com a presença do integrador $\left(\frac{1}{s}\right)$, este irá gerar o sinal ωt a partir de ω , sendo depois reinicializado a cada $2\pi \text{ rad}$ [33] (figura 18).

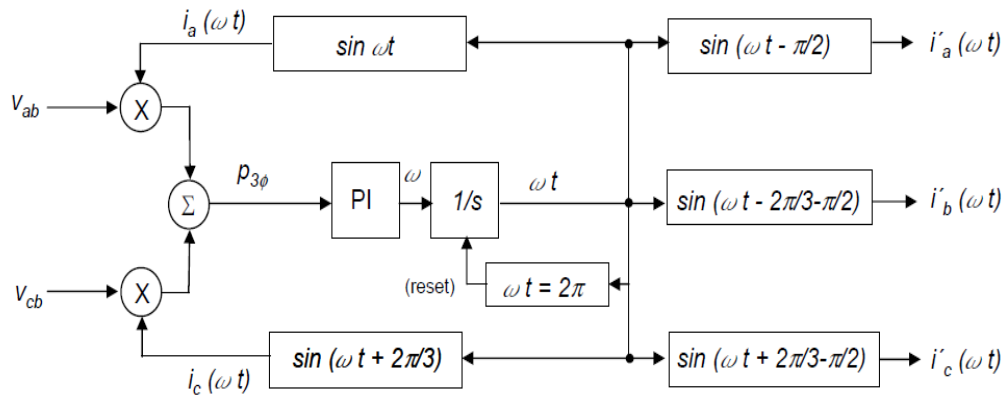


Figura 18 – Diagrama de blocos do circuito *PLL* [33]

Por forma a obter a fase correta das tensões do sistema, as correntes i'_k (onde $k = a, b, c$), devem ser atrasadas em 90° . As correntes fictícias podem ser então obtidas nas coordenadas $\alpha\beta$, conforme equação (46) [33].

$$\begin{cases} i'_\alpha = \sin(\omega_1 t) \\ i'_\beta = -\cos(\omega_1 t) \end{cases} \quad (46)$$

3.5 Resultados simulação

No sentido de analisar o sistema desenvolvido, foram efetuadas diversas simulações no qual se utilizou um sistema trifásico de tensões e o dispositivo de compensação *STATCOM*. Na figura 19 apresenta-se o sistema de blocos desenvolvido no software Matlab/Simulink.

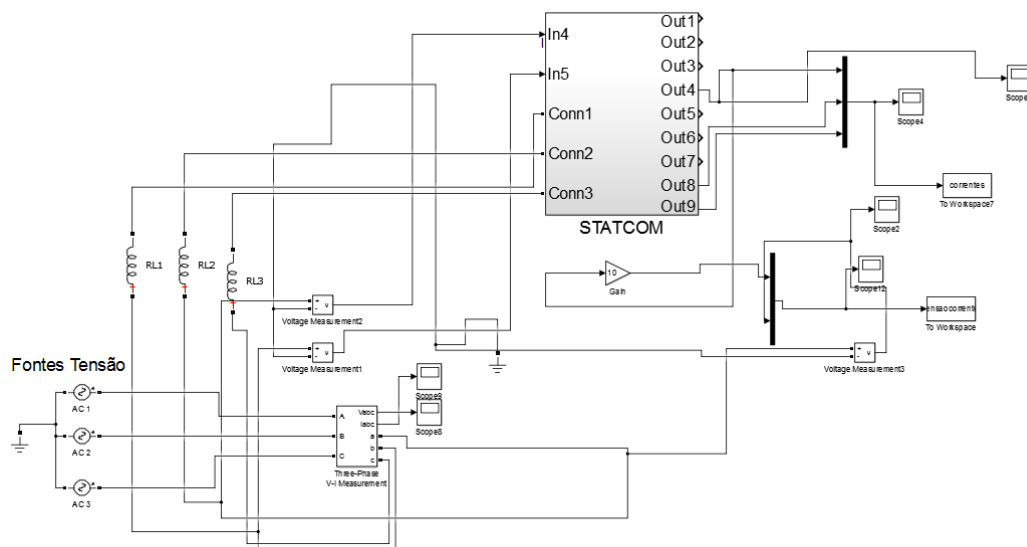


Figura 19 – Sistema de blocos

O primeiro teste foi efetuado de modo a que o dispositivo *STATCOM* apresente um comportamento com caráter capacitivo. Na figura 20 apresentam-se as formas de onda da tensão e da corrente, a saída do dispositivo *STATCOM*. Conforme é possível verificar constata-se que a corrente encontra-se em avanço da tensão, pelo que o dispositivo *STATCOM*, encontra-se a funcionar como compensador capacitivo.

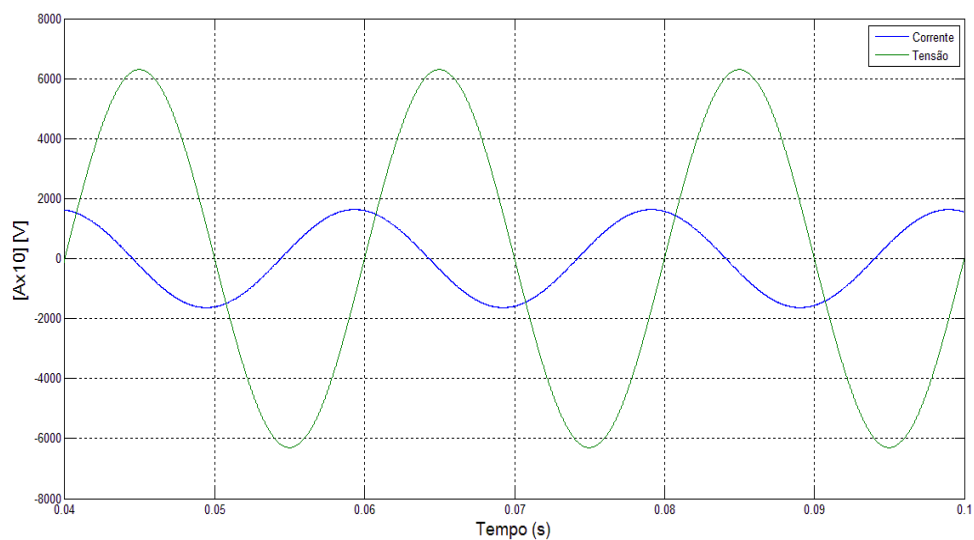


Figura 20 – Tensão e corrente (carater capacitivo)

Relativamente a este ensaio, apresenta-se na figura 21 as correntes trifásicas do *STATCOM*. Conforme é possível verificar através desta figura, as correntes apresentam-se praticamente sem distorção e em equilíbrio.

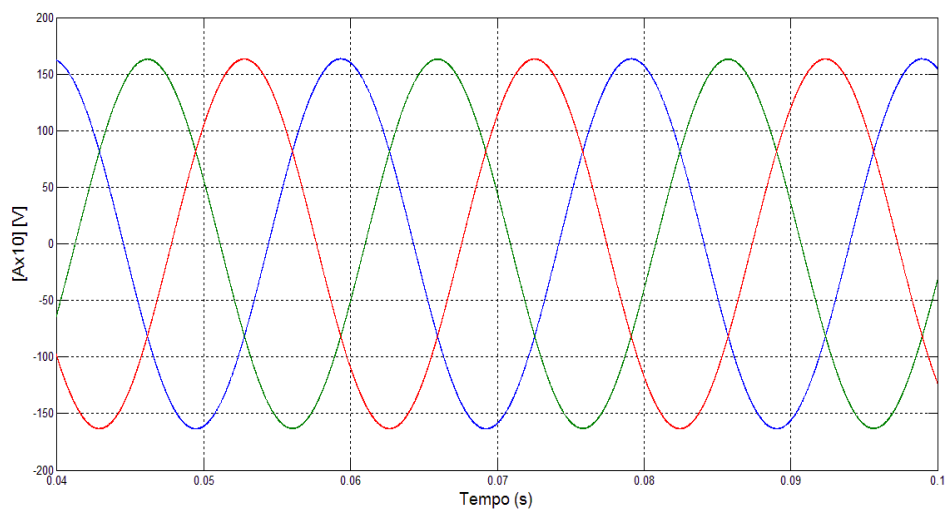


Figura 21 – Correntes à saída dispositivo *STATCOM* (carater capacitivo)

Na figura 22 apresenta-se um resultado de simulação no qual se efetuou um controlo do STATCOM de modo a apresentar um comportamento indutivo. Conforme é possível verificar através destas formas de onda, à saída do dispositivo *STATCOM* a tensão encontra-se em avanço da corrente, o que significa que este dispositivo encontra-se a funcionar como compensador indutivo.

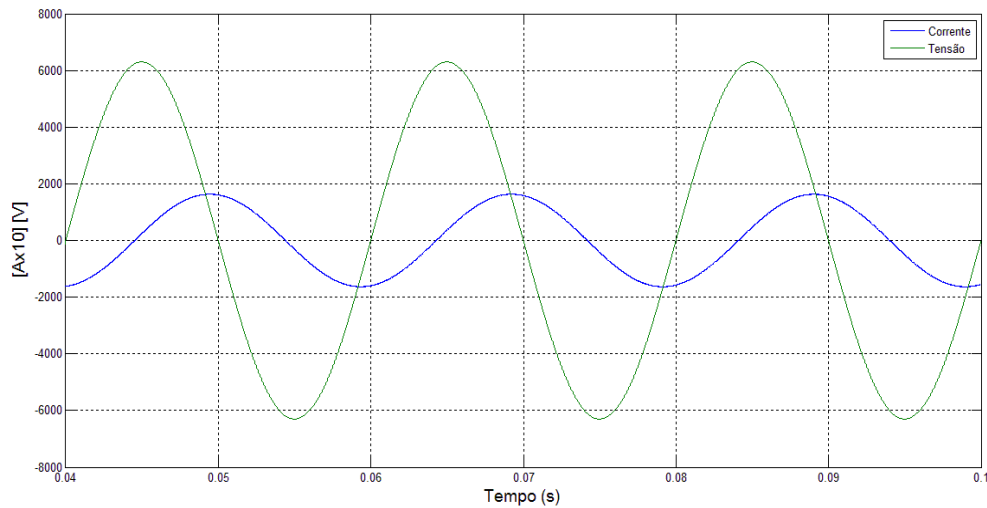


Figura 22 – Tensão e corrente (carater indutivo)

Na figura 23 apresentam-se as correntes do sistema trifásico à saída do dispositivo *STATCOM*, com este dispositivo a funcionar como compensador indutivo. Também nesta situação as correntes apresentam-se praticamente sem distorção e equilibradas.

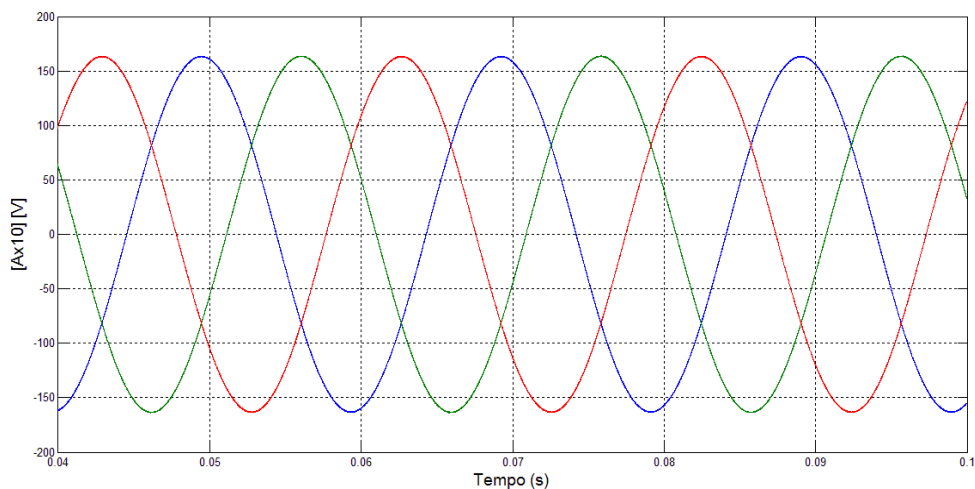


Figura 23 – Correntes à saída dispositivo *STATCOM* (carater indutivo)

Na figura 24 apresentam-se as formas de onda da tensão e da corrente, à saída do dispositivo *STATCOM*, com a particularidade de se verificar que o dispositivo *STATCOM*, encontra-se a funcionar como compensador capacitivo (corrente encontra-se em avanço da tensão) até aos 0,07 segundos da simulação, passando após esse instante a funcionar como compensador indutivo (tensão encontra-se em avanço da corrente). Conforme é possível verificar por esta figura, o compensador apresenta uma boa resposta dinâmica.

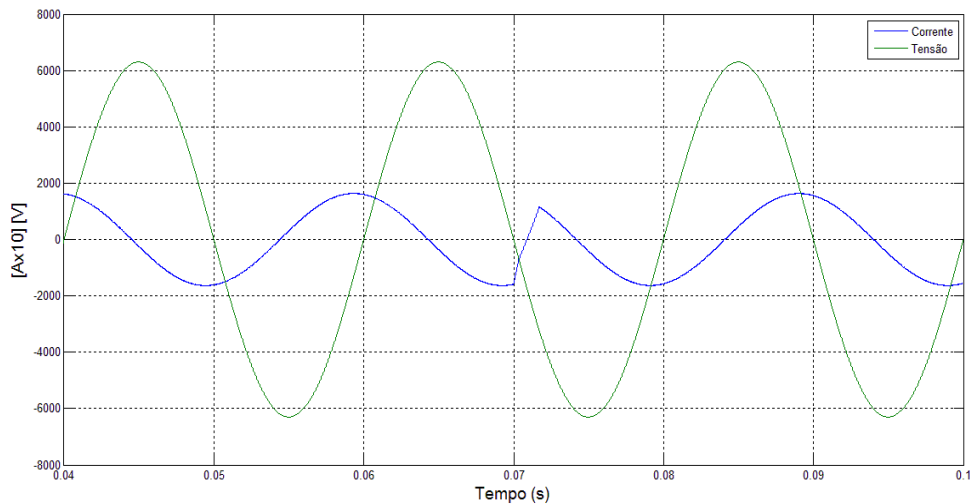


Figura 24 – Tensão e corrente (carater capacitivo para indutivo)

Um novo teste para analisar o comportamento dinâmico do sistema foi efetuado. Neste caso optou-se pelo oposto ao da situação anterior, ou seja o dispositivo *STATCOM*, encontra-se a funcionar como compensador indutivo (tensão encontra-se em avanço da corrente) até aos 0,07 segundos da simulação, passando posteriormente a funcionar como compensador capacitivo (corrente em avanço da tensão). Na figura 25 apresenta-se o resultado obtido para a tensão e corrente do *STATCOM*, verificando-se novamente uma boa resposta dinâmica deste dispositivo.

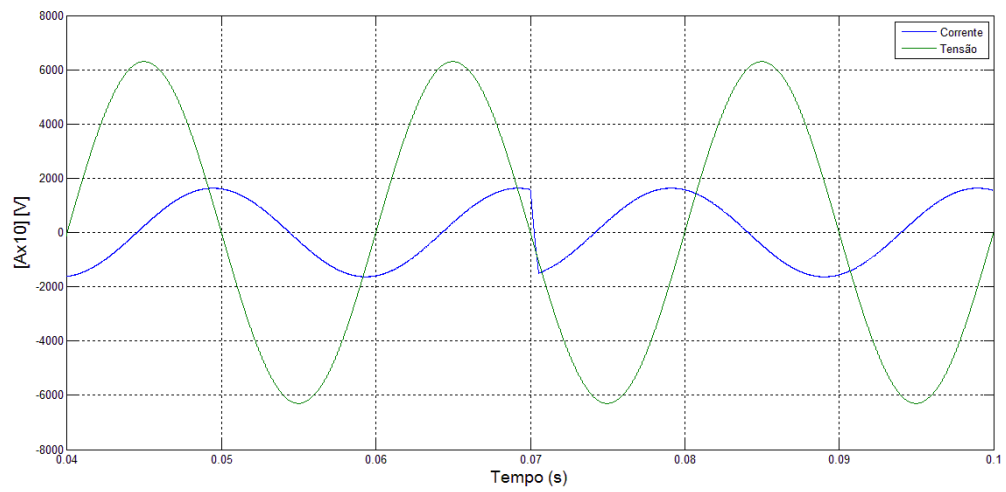


Figura 25 – Tensão e correntes (carater indutivo para capacitivo)

Capítulo 4

Sistema de Cogeração

4.1 Definição de cogeração

O conceito de cogeração segundo o decreto de Lei nº 186/95 de 27 de Julho define que a cogeração é um processo de produção combinada de energia elétrica e de energia térmica destinando-se ao consumo próprio ou ao consumo de terceiros [18].

Este processo de produção e utilização em simultâneo de energia térmica/elétrica, irá permitir uma poupança de energia primária e um aumento de rendimento da produção de toda a energia elétrica da instalação se confrontar a produção e consumo de energia elétrica de forma independente [19].

4.2 Vantagens da cogeração

Constata-se que os sistemas de cogeração representam em termos energéticos uma alternativa de elevada eficiência, pois estes irão permitir uma redução acentuada na fatura energética, em instalações onde se utilize energia térmica e elétrica em simultâneo.

Irá se verificar também uma redução do impacto ambiental ocasionado pela transformação de energia, dado que será efetuada uma “queima” mais eficiente dos combustíveis, que conduzirá a uma redução das emissões de gases de efeito de estufa [20].

Uma das grandes vantagens da cogeração está relacionada com o facto de se obter uma redução do consumo de energia primária, uma vez que se verificar uma poupança de cerca de 15% a 30% de energia primária necessária para produzir de forma separada eletricidade e calor [20].

Em termos de produção descentralizada de energia elétrica a cogeração aparece como sendo uma solução muito viável, pois permite reduzir todos os custos relacionados com o transporte de energia elétrica (evita perdas no transporte).

Com o sistema de cogeração verifica-se uma elevada eficiência dos sistemas de conversão e utilização de energia, assim como um amplo leque de combustíveis a recorrer, por exemplo: desperdícios, gás propano, biomassa, gás natural.

Poderá se colocar como grande vantagem a não dependência de terceiros para o fornecimento de energia elétrica [20].

4.3 Desvantagens da cogeração

Apesar de todas as vantagens, em termos de eficiência energética da cogeração é necessário referir também algumas desvantagens.

Verifica-se em alguns casos de instalação de novas cogerações, apesar de se obter índices de poupança energética elevados, o retorno do investimento poderá não ser viável devido à longevidade do mesmo.

Numa situação de uma unidade fabril que se altere excessivamente o processo de produção poderá se verificar repercussões negativas na cogeração da mesma unidade.

É fundamental referir também os problemas de poluição sonora e ambiental, no local onde se encontram instalados os equipamentos [20].

4.4 Sistemas de cogeração

Existem vários sistemas de cogeração que permitem uma adequação a um determinado processo fabril. Os sistemas de cogeração têm normalmente as seguintes designações:

- Turbina de Vapor (Ciclo de Rankine)
- Turbina de Gás (Ciclo de Brayton)
- Ciclo combinado
- Motor alternativo de combustão interna (Ciclo Diesel ou Otto)
- Micro-Turbinas
- Pilhas de combustível

Apesar desta vasta gama de tecnologias disponíveis as que têm tido uma aplicação mais vasta são as primeiras quatro, uma vez que as duas últimas tecnologias estão ainda numa fase de investigação e desenvolvimento e numa primeira fase de comercialização, sendo muitas vezes designado na literatura como tecnologias emergentes.

A turbina de vapor (ciclo de Rankine), poderá operar usando a água ou gás como fluido de trabalho. Observa-se em muitos casos a utilização deste tipo de tecnologia nas centrais convencionais que funcionam a carvão ou fuel óleo [22].

Perante a utilização de um fluido de trabalho que é o gás, este altera a sua composição ao longo do ciclo. As tecnologias que recorrem a este tipo de fluido são as tecnologias de motores alternativos de combustão interna (ciclo Diesel ou Otto) e turbina de gás (ciclo de Brayton).

4.4.1 Turbina de Vapor (Ciclo de Rankine)

As turbinas de vapor encontram-se divididas em dois grandes grupos: turbinas de condensação (Figura 26) e turbinas de contrapressão (Figura 27).

Com as turbinas de condensação, a pressão de saída do vapor é inferior à pressão atmosférica, sendo então necessário adicionar um condensador. As turbinas de contrapressão têm a pressão do vapor de saída, superior à pressão atmosférica.

O sistema de cogeração com recurso à utilização de uma turbina de vapor, tem na sua constituição os seguintes elementos: pré-aquecedor de água, caldeira, turbina, condensador e gerador elétrico.

O funcionamento deste sistema tem início no pré aquecimento da água, sendo esta posteriormente encaminhada para a caldeira, onde atinge valores de temperatura que permite produzir vapor de alta pressão. Este vapor irá entrar na turbina onde irá sofrer uma expansão que faz com que a energia do vapor se transforme em energia mecânica. Dado que acoplado ao eixo da turbina encontra-se um gerador, irá existir uma transformação de energia mecânica em elétrica.

O vapor após acionar o turbo grupo ainda se encontra a uma pressão relativamente alta, este poderá ser direcionado para o processo.

Esta tecnologia tem como grandes vantagens o facto de ter um tempo de vida elevado, ser um equipamento seguro, não necessitar de uma supervisão muito restrita, apresentar uma maior eficiência global, uma continuidade de serviço elevada e um maior tempo entre paragens para manutenção.

No entanto pode-se verificar como desvantagens, o facto de ser necessário um investimento financeiro inicial muito acentuado, alguns problemas no controlo de

emissões de poluentes, tecnologia limitada a certas aplicações, e apresentar um rendimento elétrico baixo [21] [22] [23].

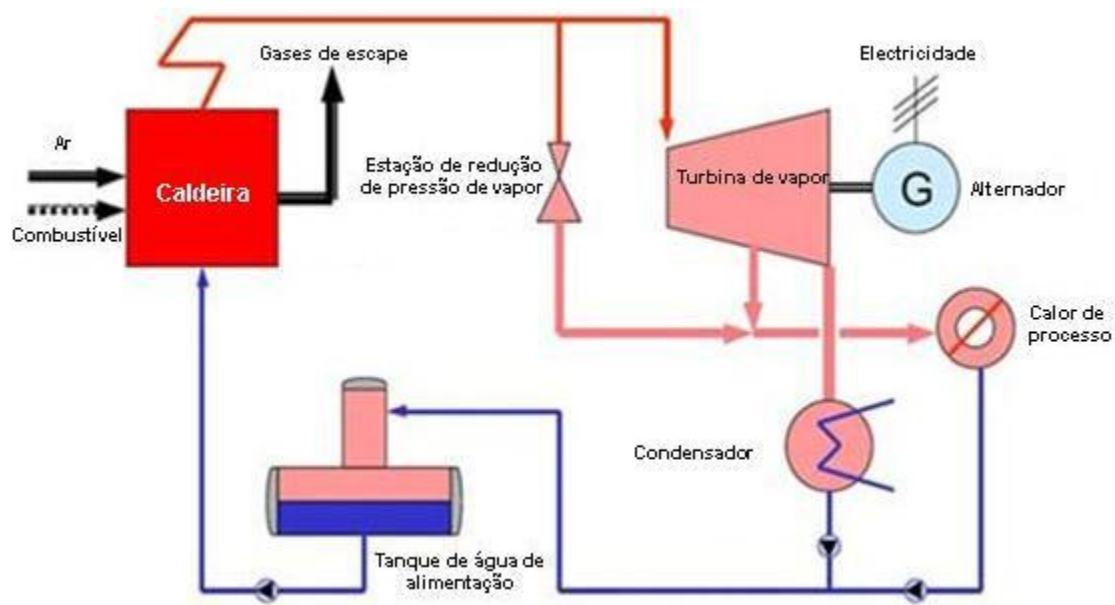


Figura 26 – Ciclo de turbina de condensação com extração de vapor [21]

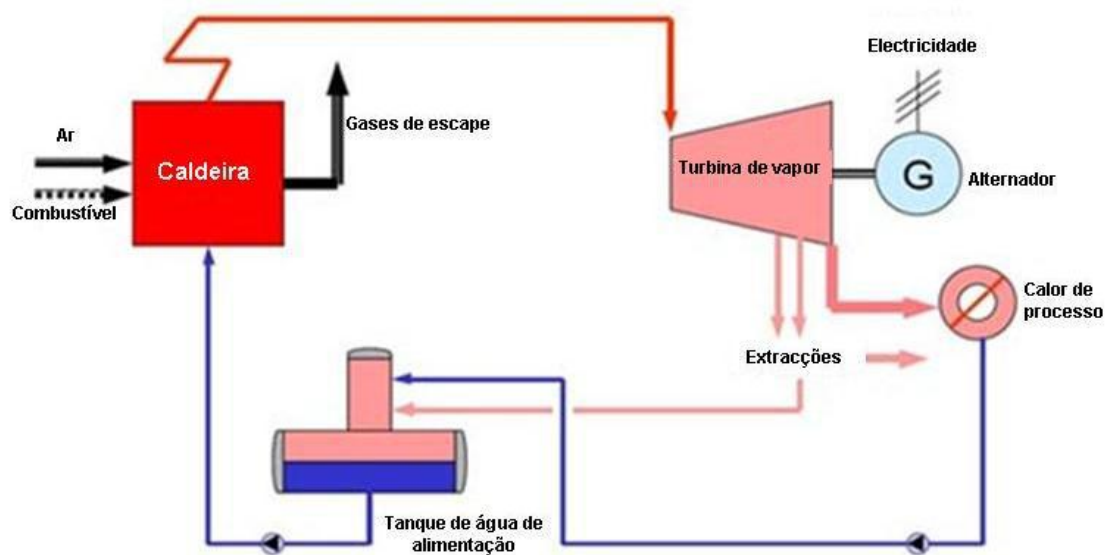


Figura 27 – Ciclo de turbina de vapor em contrapressão [21]

4.4.2 Ciclo combinado

O sistema de cogeração em ciclo combinado é composto por turbinas a gás e por turbinas a vapor.

Uma das grandes utilidades deste sistema é a utilização dos gases de saída da turbina a gás que ainda se encontram a temperaturas elevadas e são utilizados para queima numa caldeira de recuperação, produzindo-se assim vapor que irá ser utilizado para acionar uma turbina de vapor.

Este sistema tem como vantagens a elevada eficiência energética, redução dos custos de operação e flexibilidade na produção de energia térmica. No entanto o sistema apresenta como grandes desvantagens a sua complexidade elevada e o facto de com a falha das turbinas a gás não ser possível colocar em funcionamento a turbina a vapor.

É notória a grande versatilidade deste sistema, que irá permitir uma melhor performance energética comparativamente ao sistema de cogeração descrito no subcapítulo 4.4.1.

Recorre-se à utilização de cogeração em ciclo combinado nas situações em que se pretenda produzir energia elétrica e térmica em quantidades variáveis de acordo com os consumidores, ou na situação de atender a mercados específicos [24].

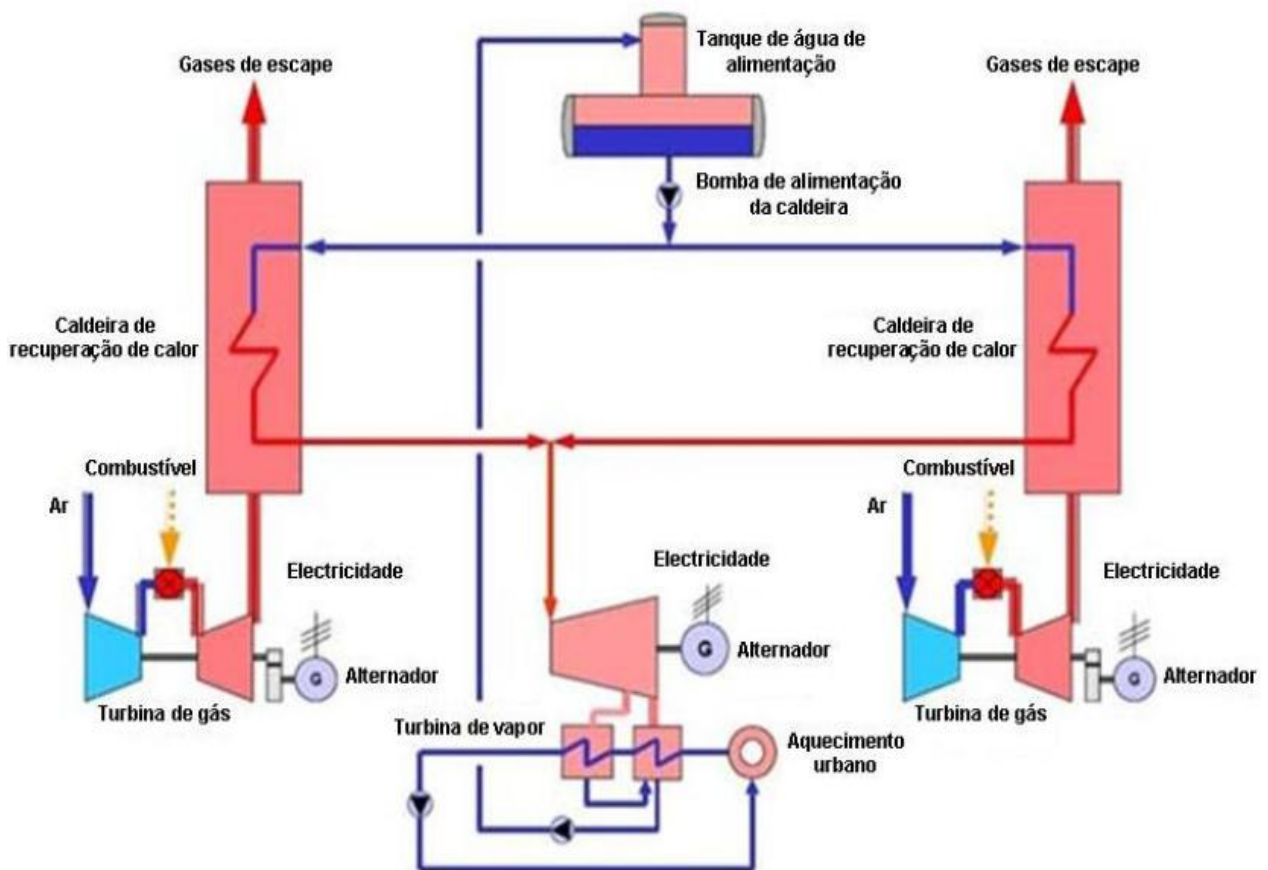


Figura 28 – Cogeração de ciclo combinado [21]

4.4.3 Motor alternativo de combustão interna (ciclo Diesel ou Otto)

Os motores alternativos de combustão interna têm uma grande aplicação em indústrias de menor dimensão, em que as necessidades térmicas não sejam muito elevadas.

Este sistema tem como principal vantagem o facto de permitir um arranque rápido, não necessitar de uma supervisão acentuada e de apresentar uma elevada eficiência mecânica. Porém tem como desvantagens o facto de ter custos de manutenção elevados, um baixo rendimento térmico e também um tempo de vida relativamente curto.

Existem dois tipos de motores de combustão interna: os motores de ignição por compressão (ciclo Diesel) e os motores de explosão (ciclo Otto). Os motores mais utilizados nas centrais de cogeração são os motores de explosão, pois têm várias fontes de recuperação de calor [24].

No ciclo Otto poderá ser utilizado como combustível o gás natural e a gasolina, enquanto que no ciclo Diesel poderá ser utilizado gasóleo, gás natural e fuelóleo.

Existem diferenças acentuadas no funcionamentos dos dois ciclos. No ciclo Otto é efetuada numa, primeira etapa, uma mistura de ar e combustível, que é comprimida com o pistão, finalizando com a ignição. No ciclo Diesel, na primeira etapa é apenas colocado ar, que é comprimido pelo pistão e só no final é que é injetado o combustível.

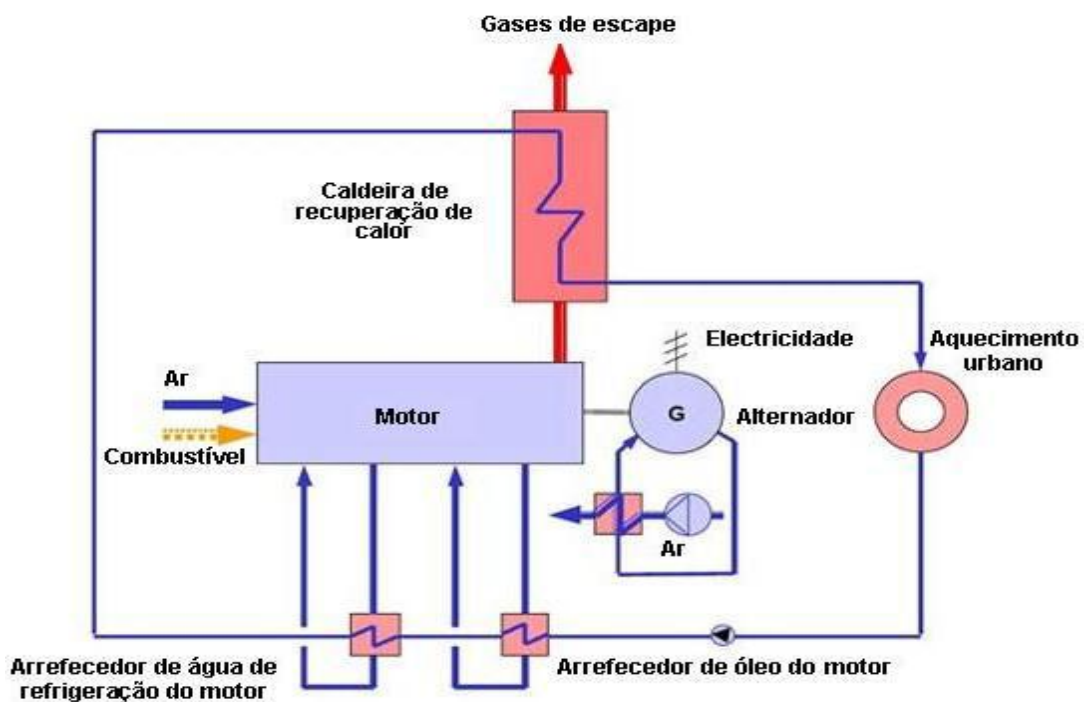


Figura 29 – Ciclo de um motor de combustão interna (Diesel e Otto) [21]

4.4.4 Micro-Turbinas

As Micro-Turbinas apesar de ainda se encontrarem numa fase inicial de comercialização e de desenvolvimento, são uma boa solução para utilizar em cogeração ou em produção de energia elétrica, para uma potência relativamente baixa.

Como o próprio nome indica (Micro-Turbina), verifica-se que estamos perante um equipamento com dimensões reduzidas, que é composto por um gerador, uma turbina, uma câmara de combustão e um compressor. O gerador fornece uma potência total de 250 kW [24].

Esta tecnologia funciona com vários tipos de combustível: gasolina, gasóleo, gás natural e biogás.

As principais vantagens desta tecnologia relacionam-se com o facto de terem uma dimensão/peso reduzido, apresentarem uma baixa emissão de gases poluentes e não necessitarem de refrigeração. No entanto apresenta como desvantagens o facto de ainda estar em desenvolvimento, ter uma baixa eficiência elétrica e apresentarem custos consideravelmente altos [24].

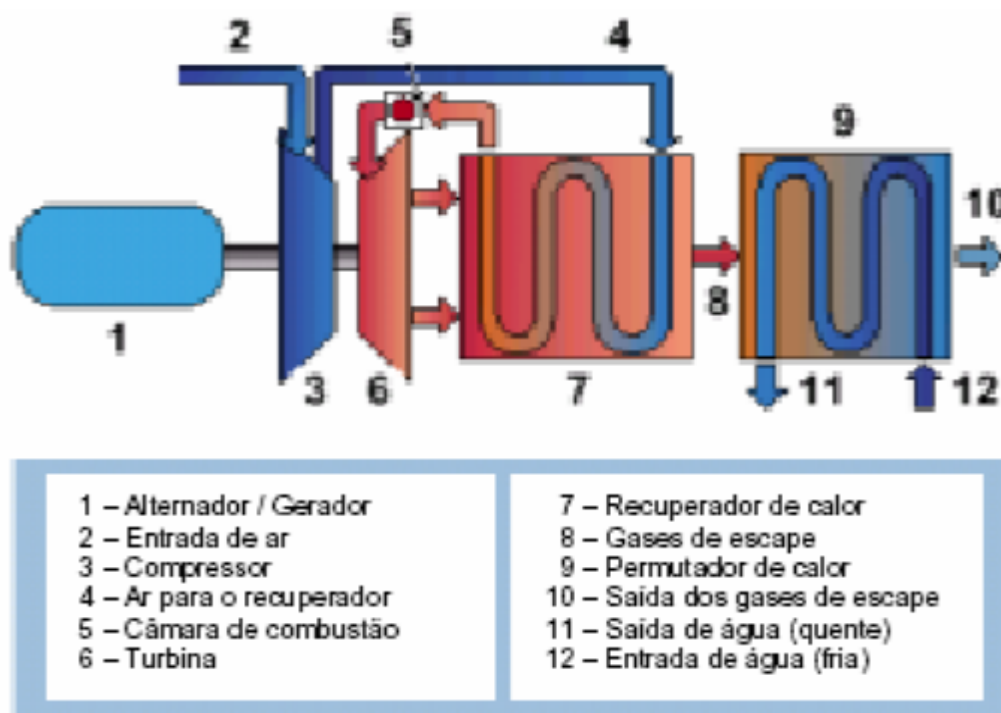


Figura 30 – Micro turbina [25]

4.4.5 Pilha de combustível

Uma pilha de combustível é um dispositivo eletroquímico que permite a conversão direta de energia química em elétrica, sem qualquer outra etapa intermédia.

A pilha irá transformar diretamente a energia da molécula de hidrogénio em eletricidade.

Constata-se que a eletrólise da água usa eletricidade para a produção de hidrogénio e oxigénio. A pilha usa o oposto, ou seja consome hidrogénio para converter em eletricidade [25].

Em termos de vantagens a pilha apresenta um ruído muito reduzido e uma baixa emissão de poluentes. As desvantagens são o custo da tecnologia, fiabilidade/durabilidade duvidosa e tecnologia em desenvolvimento [23].

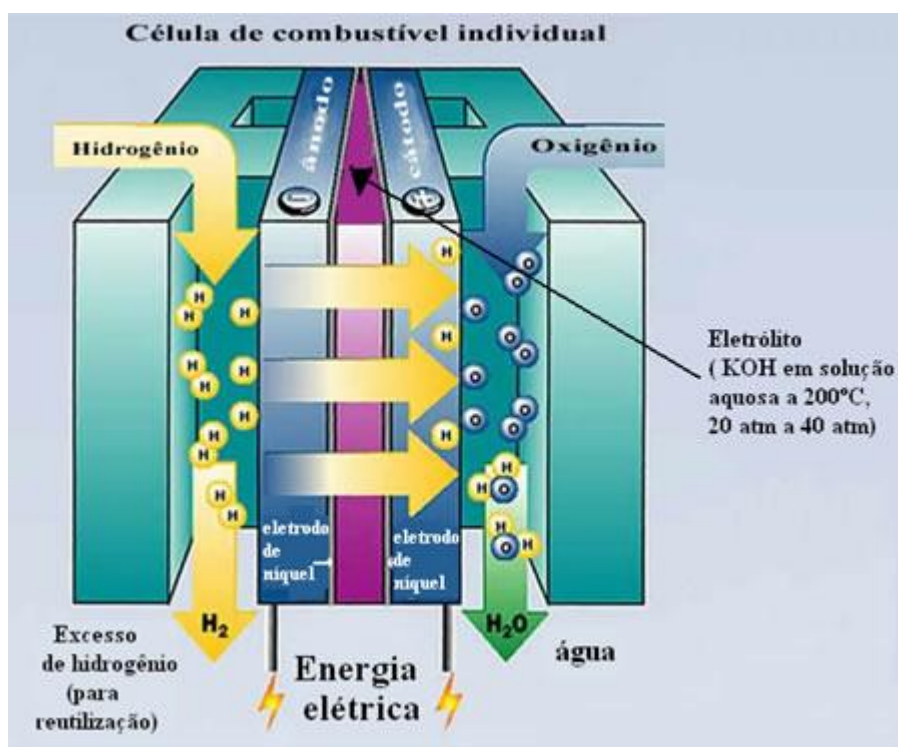


Figura 31 – Célula de combustível individual [23]

Capítulo 5

Implementação do *STATCOM* numa instalação com cogeração

5.1 *STATCOM* associado ao sistema de cogeração

Por forma a obter uma otimização num dado sistema elétrico recorre-se a colocação de equipamentos que facilitem as limitações de falhas externas ao sistema elétrico. Como já referido no capítulo 2.7, em algumas aplicações de parques eólicos, recorrem-se a *STATCOM* por forma a precaver problemas nas grandezas elétricas nos sistemas elétricos destes mesmos parques.

A instalação de compensadores síncronos estáticos é muito utilizada em subestações que se encontram inseridas no interior de parques eólicos. No entanto, em sistemas elétricos com cogeração esta instalação é relativamente recente. Este facto está relacionado com o custo deste mesmo equipamento, o que poderá levar à desistência da sua instalação.

O estudo apresentado neste trabalho em que se utiliza o dispositivo *STATCOM*, foi efetuado com base nos muitos exemplos que existem de unidades industriais que possuem sistemas elétricos semelhantes com utilização de ciclo de cogeração.

Apresenta-se na figura 32 o layout da instalação utilizada neste trabalho, onde se verifica a existência de dois transformadores, no mesmo barramento de média tensão (6,3 kV), em que um transformador será elevador de um valor de média tensão para outro valor de média tensão ($MT - 6,3kV > AT - 30kV$), e o outro transformador será redutor de média para baixa tensão ($MT - 6,3kV < BT - 0,4kV$).

Verifica-se que o *STATCOM* se encontra conectado diretamente ao barramento dos 6,3 kV, isto para compensar a potência reativa e efetuar uma estabilização da tensão neste ponto da instalação. A instalação do equipamento neste ponto é de extrema importância pois irá permitir, que no caso de se verificar a presença de cavas de tensão (em algumas situações devido a falhas no transporte/distribuição de energia), se consiga garantir a continuidade de serviço no fornecimento de energia elétrica às cargas de baixa tensão.

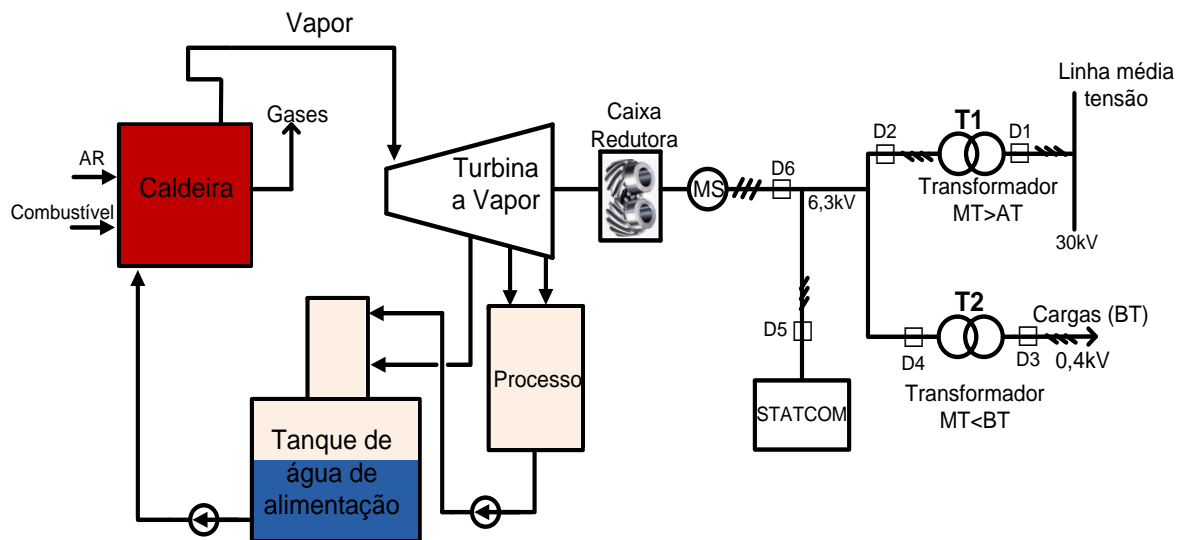


Figura 32 – Exemplo de ciclo de cogeração com *STATCOM*

A instalação exemplificada tem a particularidade de poder funcionar em ilha, ou seja, pode funcionar independentemente da rede elétrica. Isto irá permitir que mesmo que as proteções atuem no nível de tensão (30 kV) a compensação efetuada pelo *STATCOM* permita que o gerador da cogeração continue a alimentar o transformador T2.

Quando se verifica uma destabilização muito rápida na forma de onda da tensão na linha de alta tensão (30 kV), as proteções D1 ou D2 (consoante o tempo de duração da cava de tensão) poderão arrancar ou não. Em ambos os casos o *STATCOM* estará a compensar essa mesma destabilização/flutuação da tensão.

É necessário alguma precaução relativamente à compensação das cavas de tensão, pois em algumas casos pode-se não estar perante uma cava de tensão, e se verificar na realidade um defeito de maior gravidade na rede, pelo que será então necessário garantir que o *STATCOM* não se encontra a alimentar defeitos, mas sim a compensar as cavas de tensão.

5.2 Resultados de simulação sem STATCOM

Por forma a analisar o impacto deste dispositivo de compensação (*STATCOM*) na referida instalação efetuaram-se simulações onde se encontra implementada uma turbina a vapor, gerador síncrono, transformadores, linhas e carga.

Nesta primeira parte da simulação efetuou-se a simulação dos elementos anteriormente referidos sem qualquer perturbação da rede elétrica ou das respetivas cargas conectadas ao sistema elétrico.

Na figura 33 apresenta-se o diagrama de blocos utilizado no programa de simulação Matlab/Simulink para o estudo deste sistema.

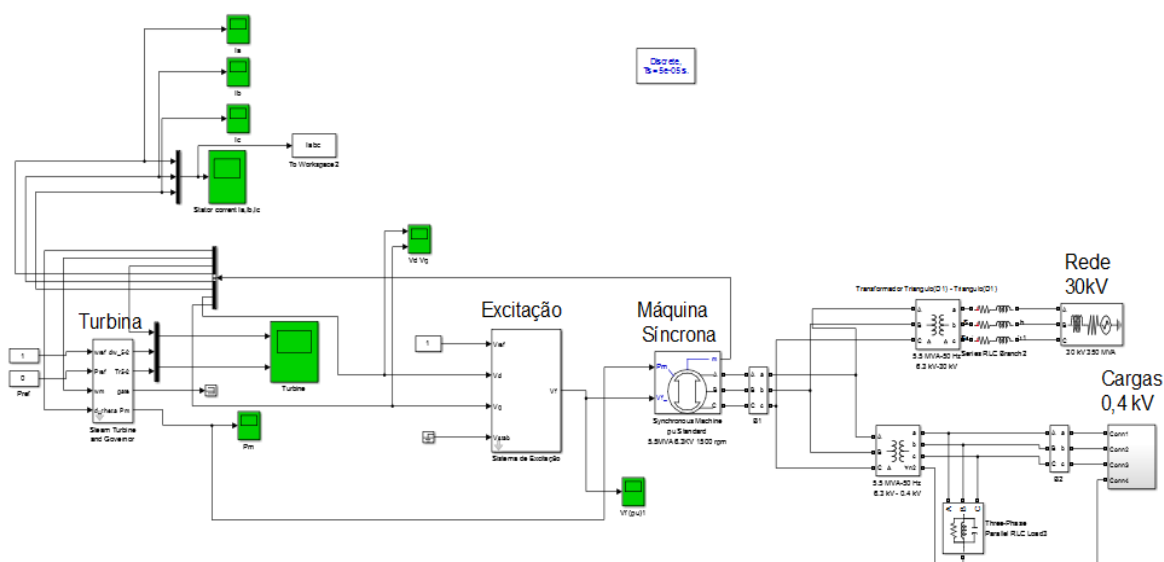


Figura 33 – Diagrama blocos Simulação turbina e máquina síncrona

Nas figuras seguintes poderá ser verificado a resposta do sistema desenvolvido, afim de ser verificado as características mecânicas e elétricas do modelo da máquina.

Na figura 34 apresenta-se o desvio da velocidade do rotor (em p.u), durante os quatro segundos de simulação. Através deste resultado, constata-se que as oscilações da velocidade do rotor estabilizam aproximadamente a partir dos dois segundos de simulação.

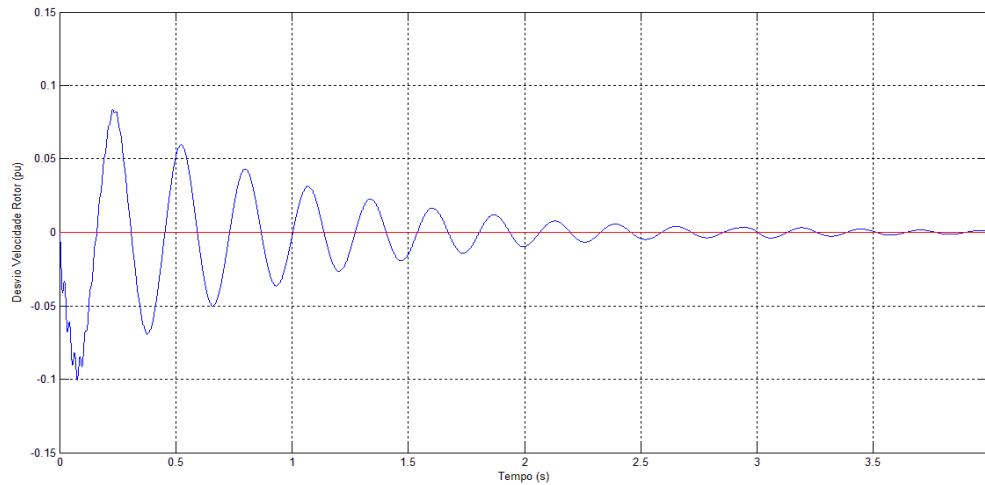


Figura 34 – Desvio velocidade do rotor (p.u)

Na figura 35 apresenta-se a potência mecânica (em unidades p.u) que é disponibilizada pela turbina que se encontra conectada à entrada da máquina síncrona. Tal como esperado, esta potência não se encontra estável.

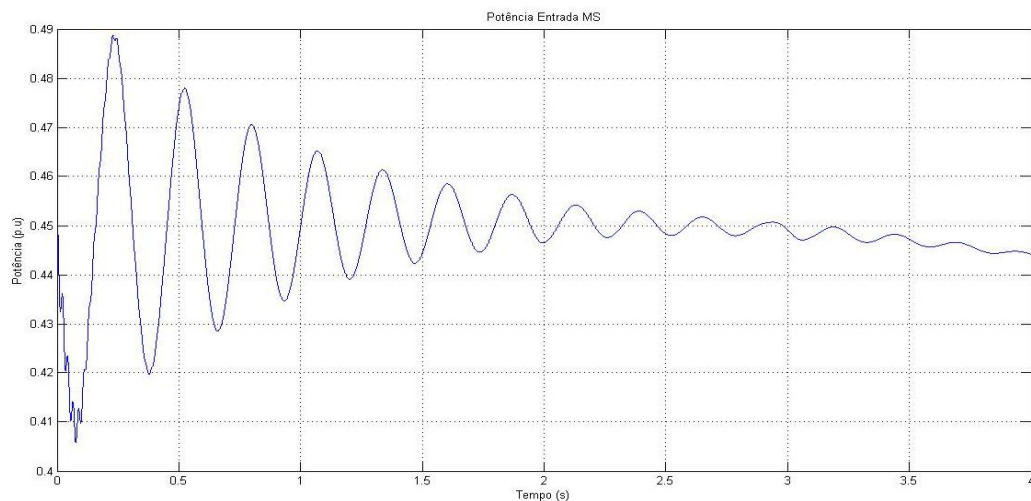


Figura 35 – Potência (p.u) Entrada Máquina Síncrona

Nas duas representações seguintes figuras 36 e 37, apresentam-se as tensões direta (V_d) e em quadratura (V_q) aos terminais da máquina síncrona, e que conectam, a entrada do sistema de excitação da máquina. À imagem do que se verificou anteriormente estas tensões apresentam inicialmente oscilações, tendendo no entanto para um valor estável.

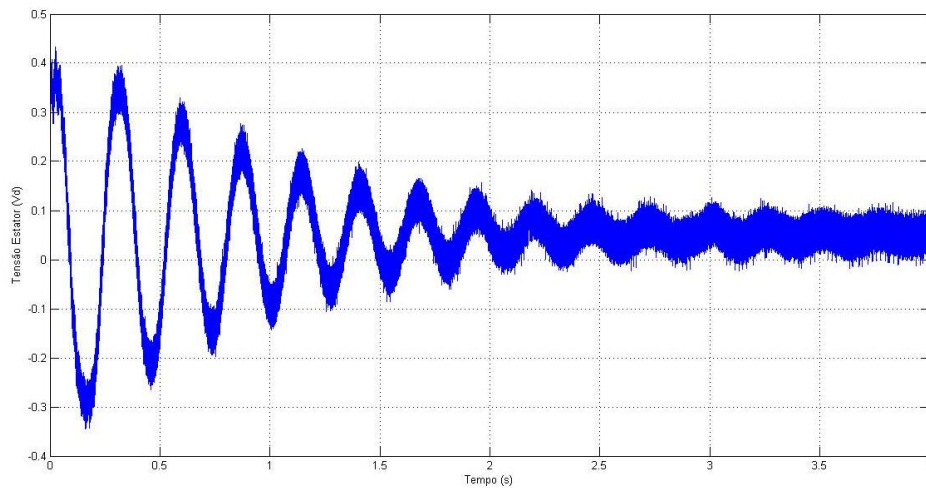


Figura 36 – Tensão V_d sistema de excitação (p.u)

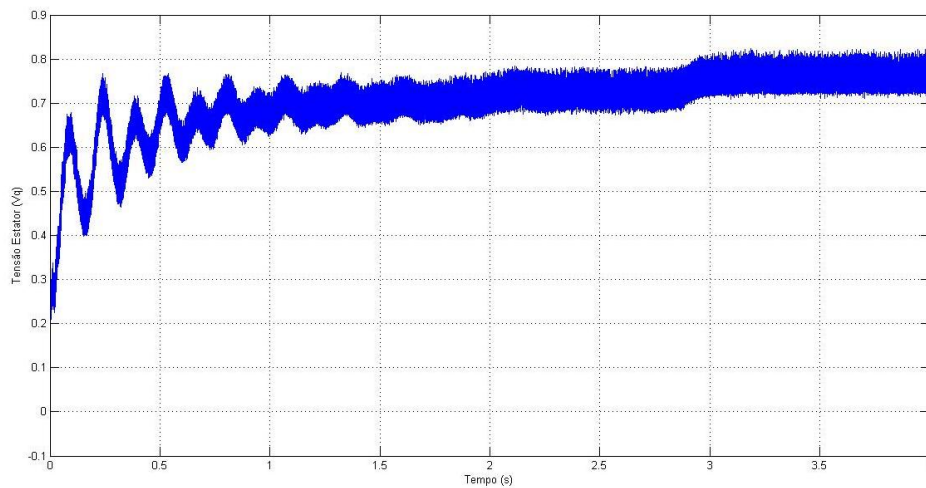


Figura 37 – Tensão V_q sistema de excitação (p.u)

As correntes de saída da máquina síncrona (I_{abc}), encontram-se representadas na figura 38. Através desta figura constata-se que as correntes no estator só estabilizam aproximadamente aos 0,6 segundos. Isto verifica-se devido às oscilações da turbina a vapor que durante o arranque apresenta algumas perturbações, tal como verificado na figura 33 (resposta da turbina).

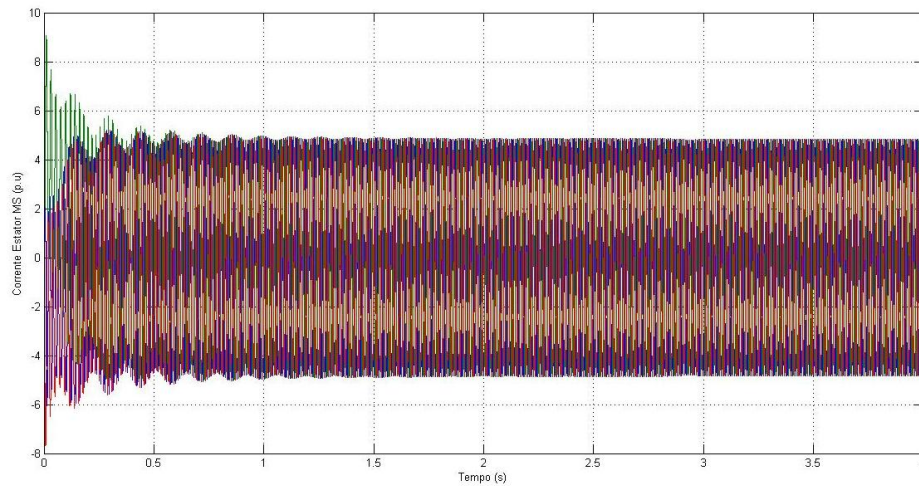


Figura 38 – Corrente I_{abc} saída máquina síncrona

A tensão à saída da máquina síncrona encontra-se representada na figura 39, de salientar que a tensão aqui representada é simples (Vs).

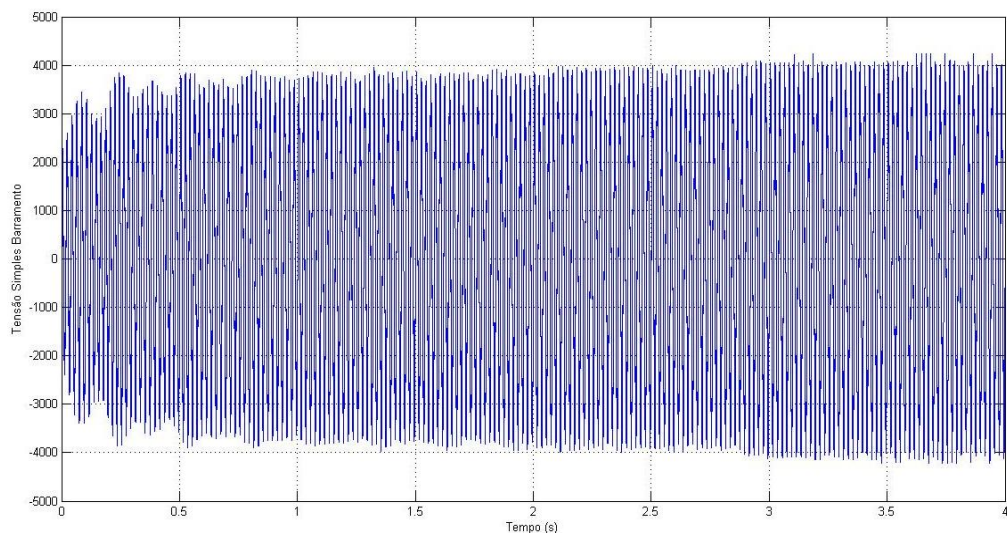


Figura 39 – Tensão simples saída máquina síncrona

5.3 Resultados de simulação com o *STATCOM*

Neste ponto apresenta-se os resultados de simulação com a inclusão do *STATCOM*, junto do barramento de 6,3 kV, tal como apresentado na figura 40. De salientar que no interior do bloco “*STATCOM*” encontram-se os seguintes elementos: o circuito que irá detetar a presença de defeitos/cavas de tensão na rede e/ou barramento, o circuito *PLL*, e o conversor de potência.

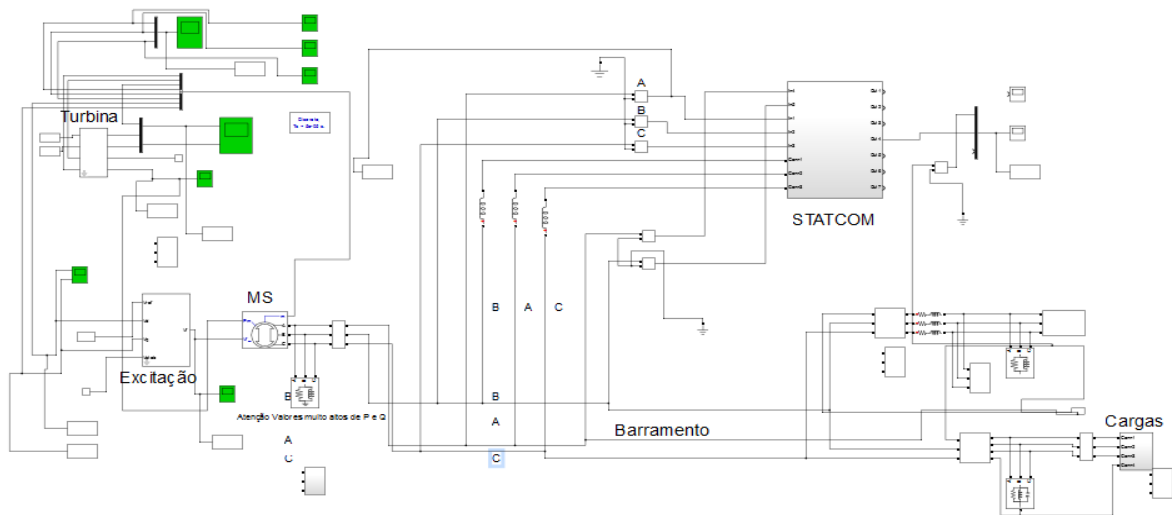


Figura 40 – Aspeto geral simulação com *STATCOM*

Na figura 41 apresenta-se o dispositivo *STATCOM*, com todos os seus componentes para o seu funcionamento.

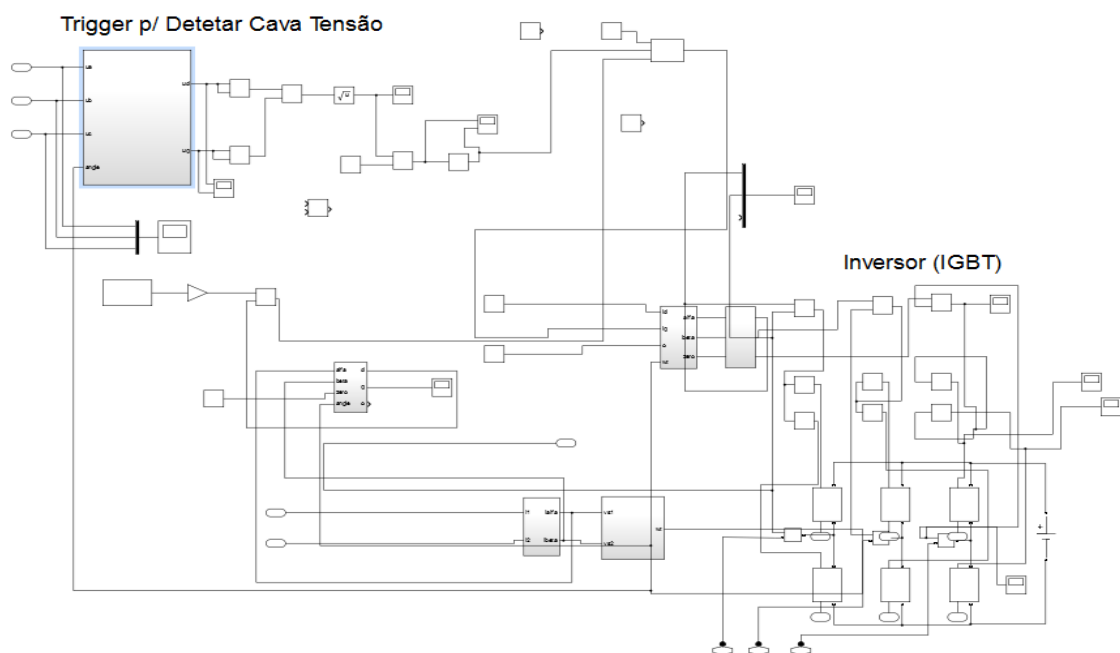


Figura 41 – Aspeto geral dos elementos do interior do *STATCOM*

Realizou-se numa primeira fase a simulação com a inclusão de um defeito na rede elétrica, de modo a observar qual seria a resposta da máquina síncrona. Nesta simulação colocou-se o defeito no princípio da linha de 30 kV (fase-terra com uma resistência de defeito de 1Ω), mas sem o *STATCOM* incluído. Apresenta-se nas figuras 42 e 43 as correntes nas fases abc da máquina síncrona, e a tensão simples no barramento dos 6,3 kV com um defeito na rede elétrica desde os 0,9 segundos até aos 2,5 segundos.

Através destes resultados é possível verificar que após o defeito a tensão no barramento irá bruscamente diminuir de valor, assim como irá entrar em oscilação. Após o desaparecimento do defeito, a tensão irá recuperar o seu valor inicial e deixando de apresentar uma oscilação na sua amplitude. Quanto às correntes, estas mantêm o seu valor mesmo após o defeito, embora se verifique uma oscilação na sua amplitude.

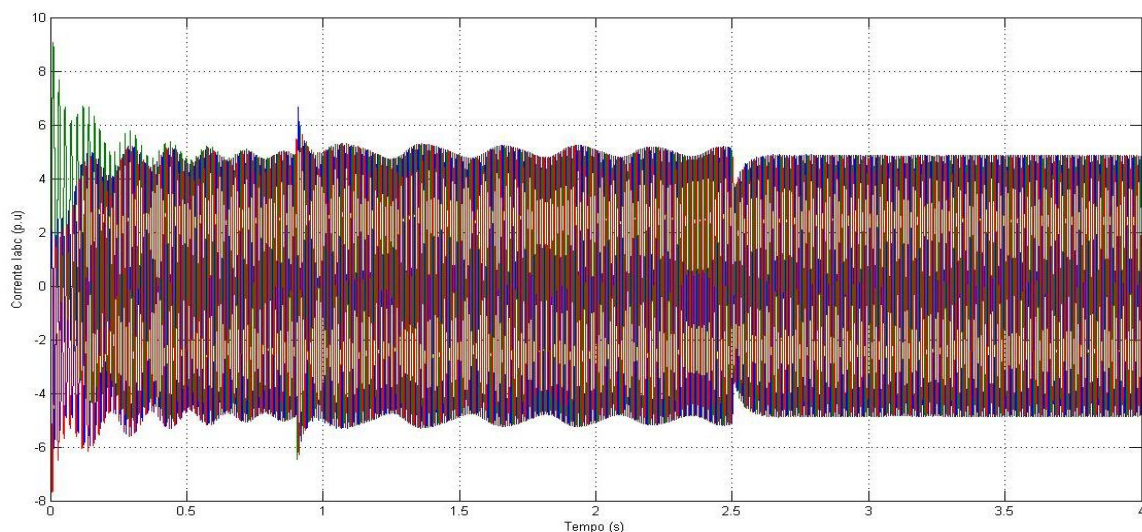


Figura 42 – Correntes Iabc da máquina síncrona com defeito na rede (Sem *STATCOM*)

$$R_{ON}=1\Omega$$

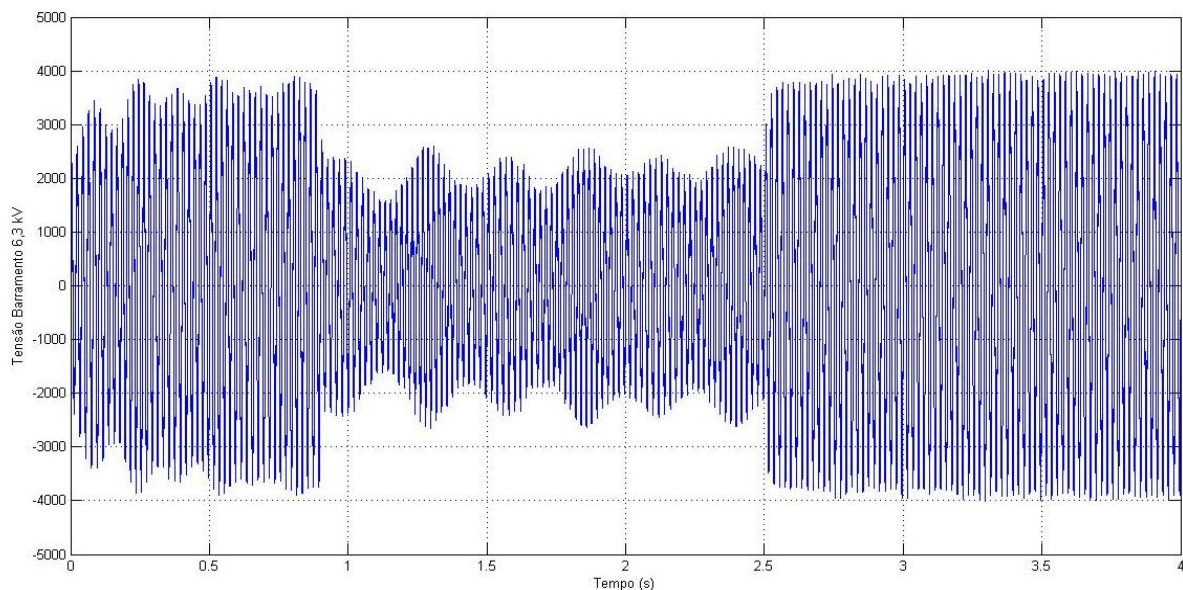


Figura 43 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (Sem *STATCOM*)

$$R_{ON}=1\Omega$$

Apresenta-se na figura 44 as correntes nas fases abc, da máquina síncrona, a tensão simples no barramento dos 6,3 kV, com um defeito na rede elétrica desde os 0,9 segundos até aos 2,5 segundos, com a entrada do *STATCOM* quando é detetado o defeito. Neste caso verifica-se que após o defeito existe um aumento de amplitude das correntes. Esta fato está relacionado com a injeção de corrente por parte do *STATCOM*.

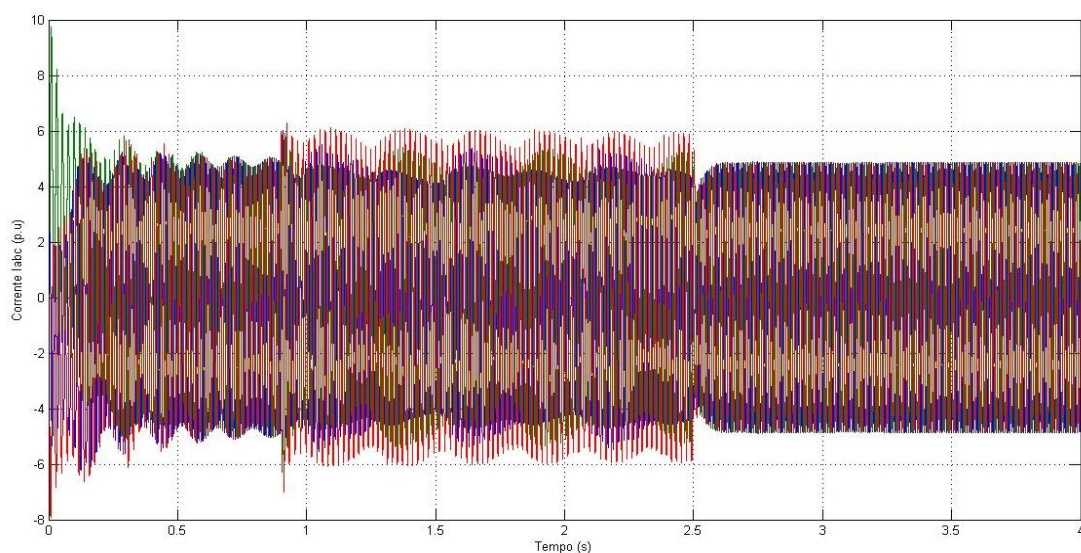


Figura 44 – Corrente Iabc máquina síncrona com defeito na rede (Com *STATCOM*)

$$R_{ON}=1\Omega$$

Pela análise da figura 45 é possível verificar que com a inclusão do *STATCOM* a cava de tensão originada pelo defeito é atenuada. De fato, neste caso a tensão encontra-se acima dos 3 kV enquanto que sem o *STATCOM* o valor de pico era 2,4 kV.

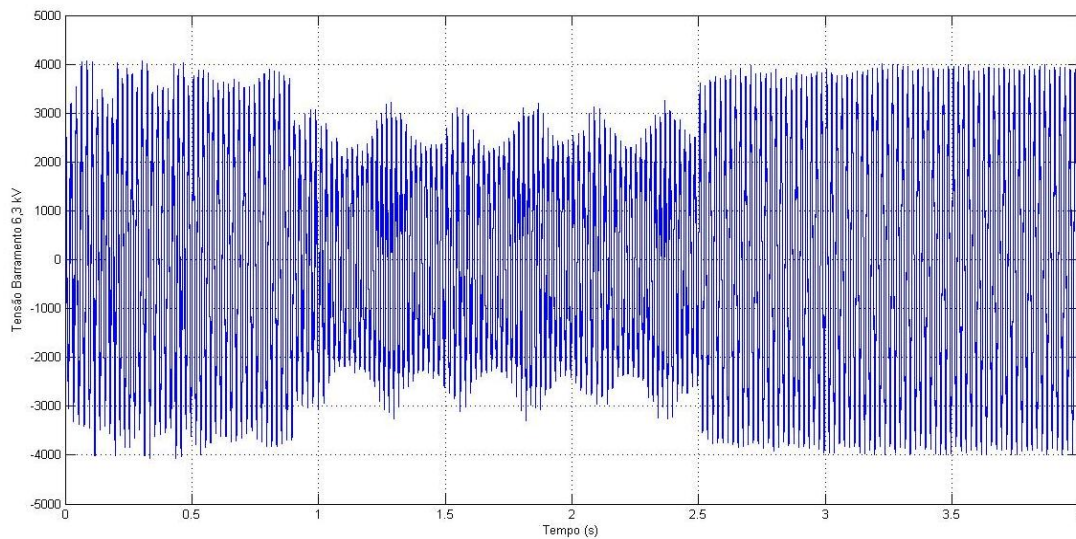


Figura 45 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (com *STATCOM*)
 $R_{ON}=1\Omega$

Na figura 46 apresenta-se a corrente reativa injetada pelo *STATCOM* no momento do defeito de modo a compensar a cava de tensão provocado pelo mesmo.

Através desta figura pode-se visualizar que existem outros momentos em que é injetada corrente reativa, nestes momentos não se verificam defeitos na rede, no entanto como a tensão desce durante breves momentos o trigger que deteta a cava de tensão coloca o *STATCOM* em serviço. O facto do *STATCOM* entrar mesmo sem defeito na rede não traz qualquer problema, pelo contrário irá trazer vantagens, pois irá permitir que a tensão no barramento esteja sempre o mais próxima do nominal.

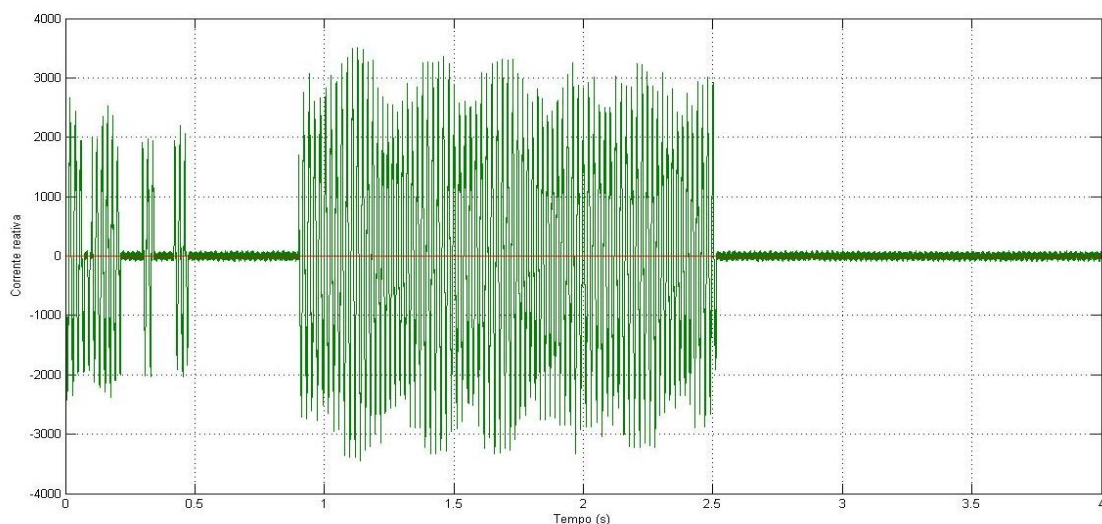


Figura 46 – Corrente reativa injetada pelo *STATCOM* ($R_{ON}=1\Omega$)

Na figura 47 apresenta-se a tensão no barramento, na presença de um defeito fase terra de resistência $1,5\Omega$.

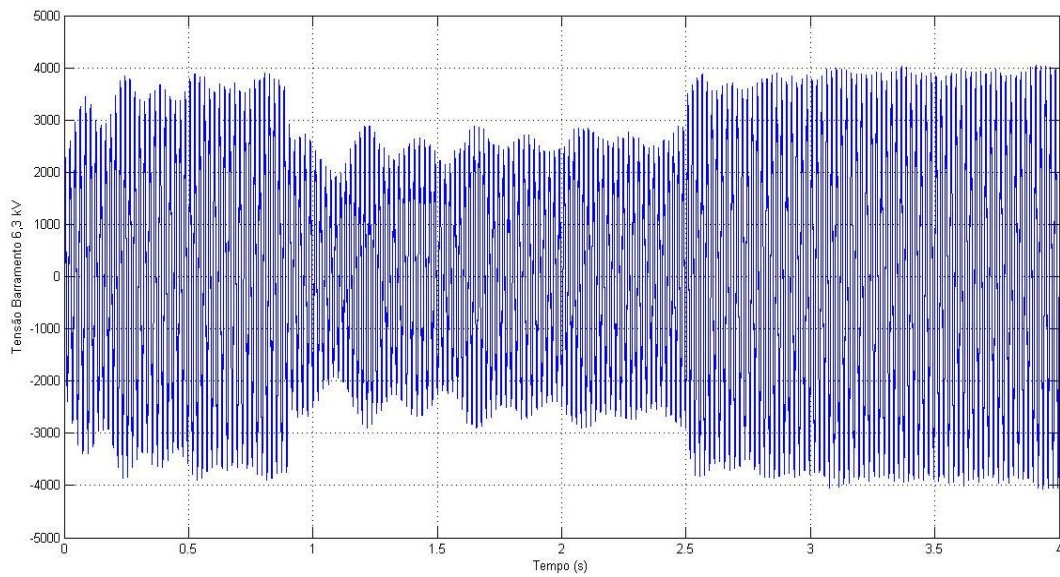


Figura 47 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (Sem *STATCOM*)

$$R_{ON}=1,5\Omega$$

Ao efetuar uma comparação da figura 48 com a figura 45 constata-se que a amplitude da tensão é mais alta na figura 48 do que na figura 45, isto devido ao fato de resistência de defeito ser mais alta na figura 48.

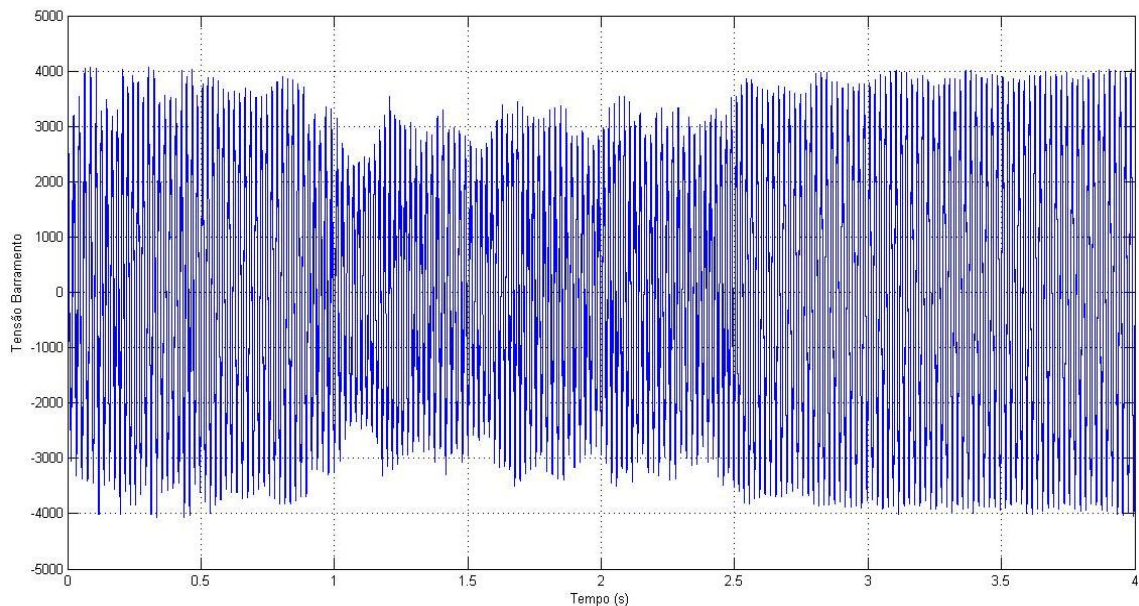


Figura 48 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (com *STATCOM*)

$$R_{ON}=1,5\Omega$$

Na figura 49 apresenta-se a tensão no barramento, na presença de um defeito fase terra de resistência $0,5\Omega$. Ao efetuar uma comparação da figura 49 com a figura 47 constata-se que a amplitude da tensão é mais baixa na figura 49 do que na figura 47, isto devido ao fato de resistência de defeito ser mais baixa na figura 49.

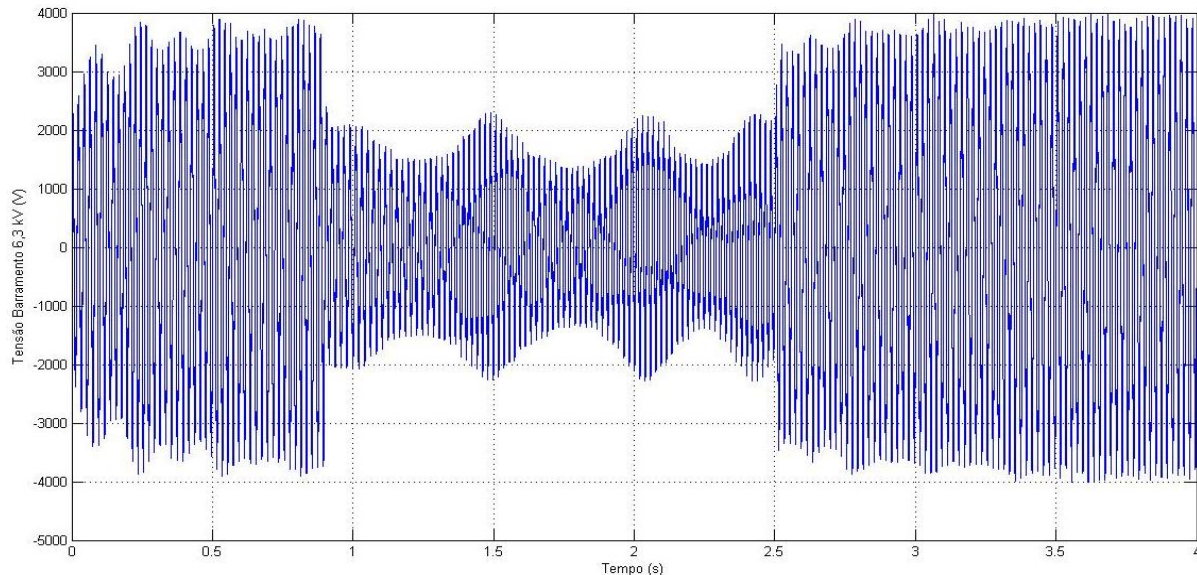


Figura 49 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (Sem *STATCOM*)

$$RON=0,5\Omega$$

Na figura 50 apresenta-se a tensão no barramento, na presença de um defeito fase terra de resistência $0,5\Omega$. Nesta figura apresentada de seguida é possível verificar que a amplitude de tensão é mais baixa, do que na figura 48 e 45, isto porque a resistência de defeito é a mais baixa.

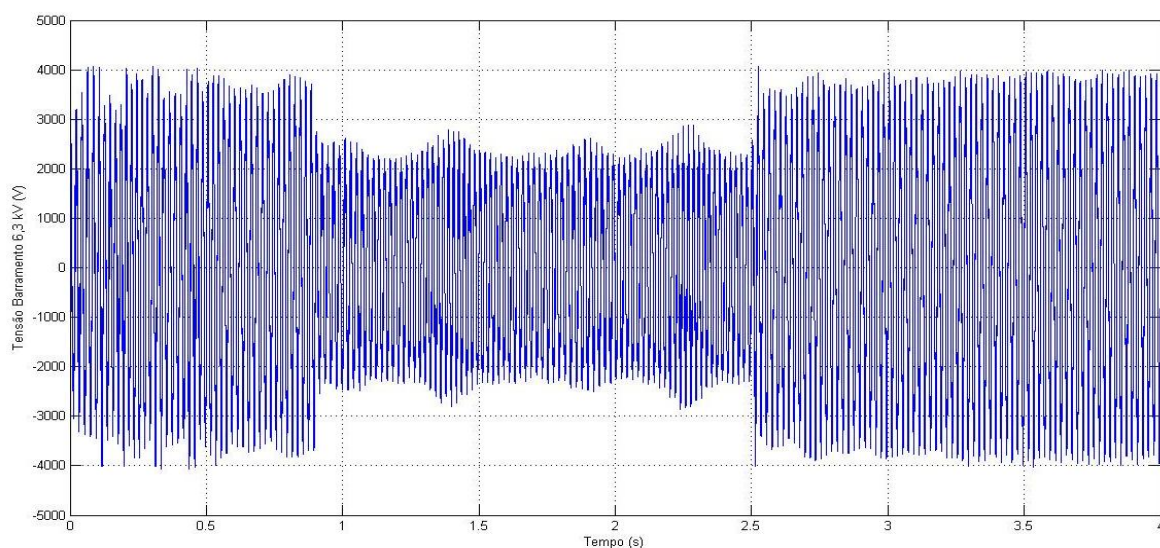


Figura 50 – Tensão no barramento 6,3 kV com defeito na rede (Com *STATCOM*)

$$RON=0,5\Omega$$

É apresentado na tabela 1 as várias tensões no barramento com a variação da resistência de defeito na rede. A partir destes valores é possível averiguar o comportamento do sistema.

De salientar que para a obtenção dos mesmos valores utilizou-se o mesmo tempo de simulação, isto é quatro segundos, onde se colocou o defeito na rede desde os 0,9 segundos até aos 2,5 segundos. Os valores apresentados estão relacionados com o tempo em que a cava de tensão se encontra presente no barramento.

Verifica-se pela análise tabela 1 que a tensão simples no barramento irá aumentar consoante o aumento da resistência de defeito, o mesmo não se verifica com a corrente reativa, pois quanto maior a resistência de defeito, menor será a corrente reativa injetada no barramento pelo *STATCOM*.

Tabela 1 – Variações tensão barramento Vs Corrente reativa injetada

Resistência de defeito (RON)	Tensão simples no barramento. (Valor mínimo) (V)	Tensão simples no barramento. (Valor máximo) (V)	Corrente reativa injetada no barramento (Valor mínimo) (A)	Corrente reativa injetada no barramento (Valor máximo) (A)
RON=0,5 Ω	2013	2348	923	1518
RON=0,7 Ω	2034	2354	908	1476
RON=0,9 Ω	2057	2361	903	1444
RON=1,1 Ω	2096	2367	901	1348
RON=1,3 Ω	2146	2371	893	1321
RON=1,5 Ω	2180	2378	874	1291
RON= 2 Ω	2285	2392	854	1185

Capítulo 6

Conclusões

No presente trabalho apresentou-se um estudo onde se utiliza um dispositivo *STATCOM* num sistema com cogeração. Através deste estudo foi possível verificar que este dispositivo atenua os problemas das cavas de tensão neste tipo de instalações. A instalação elétrica apresentada é um exemplo do que se pode constatar em instalações existentes, a nível da indústria. De salientar que o exemplo apresentado é genérico, não se encontrando associado a nenhuma instalação em particular.

A solução proposta de implementação de um compensador estático síncrono – *STATCOM* foi efetivada num nível de média tensão, constatando-se que na presença de uma cava de tensão este permite uma compensação de tensão através da injeção de potência reativa no barramento.

Neste trabalho desenvolveu-se um dispositivo *STATCOM* baseado num inversor trifásico em ponte. Também se propôs um sistema de controlo para este dispositivo. Neste sentido, apresentou-se um controlador histerético para as correntes alternadas e um compensador PI para a estabilização da tensão do condensador CC do inversor. Para o circuito de captura de fase (*PLL*) propôs-se um circuito baseado na potência trifásica instantânea.

Foram realizadas várias simulações por forma a perceber o comportamento do sistema, efetuou-se numa primeira fase a simulação sem a presença do *STATCOM*, apenas com a turbina a vapor, máquina síncrona, transformadores e respectivas cargas, para perceber qual o comportamento do sistema na presença de uma cava de tensão na rede elétrica. De salientar que nas várias simulações colocou-se uma resistência de defeito relativamente baixa entre $0,5\Omega$ e 2Ω , isto para se obter um defeito na rede elétrica com alguma dimensão e constatar que o equipamento se encontrava habilitado a atenuar o problema das cavas de tensão.

Após efetuar a simulação do sistema elétrico realizou-se a respectiva simulação do dispositivo *STATCOM*, por forma a verificar o comportamento deste aquando da conexão ao barramento onde se encontra também a máquina elétrica da cogeração.

Conclui-se, após análise dos dados obtidos das varias simulações que a solução apresentada funciona de forma eficaz permitindo assim otimizar todo o sistema elétrico de uma instalação.

Por forma a validar o bom funcionamento de todo o sistema e das respetivas grandezas elétricas envolvidas, foram elaboradas várias simulações recorrendo ao software MATLAB-Simulink.

Referências bibliográficas

- [1] A. F. Huweg, S. M. Bashi, N. Mariun and N. F. Mailah, A STATCOM Simulation Model to Improve Voltage Sag Due to Starting of High Power Induction Motor, National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia
- [2] H. Molavi, M. M. Ardehali, Application of Distribution Static Compensator (D-STATCOM) to Voltage Sag Mitigation, Malaysia Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering 1(2): 11-15, 2013
- [3] Shubham Gupta, Comprehensive STATCOM Control For Distribution And Transmission System Applications, University of Western Ontario - Electronic Thesis and Dissertation Repository, August 2014.
- [4] <http://www.abb.ca/> (Acedido em 25 Julho 2015)
- [5] Y. Sumi, Y. Harumoto, T. Hasegawa, M. Yano, K. Ikeda, T. Matsura, “New Static var Control Using Force-Commutated Inverters”, *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, No. 9, pp. 4216-4224, September, 1981.
- [6] T. Ogura, H. Matsud, S. Iesaka, H. Ohashi, “IEGT: A new generation high power MOS gated transistor”, Proceedings of IPEC 2000, Vol. 1, pp. 258-262, Tokyo, 2000.
- [7] M. Mori, “A HiGT – A New Generation High-Conductivity IGBT”, Proceedings of IPEC 2000, Vol. 1, pp. 263-268, Tokyo, 2000.
- [8] L. Gyugyi, N.G. Hingorani, P.R. Nannery, N. Tai “Advanced Static var Compensator Using Gate Turn-off Thyristors for Utility Applications”, Cigré 1990 Session, paper No. 23-203, September, 1990.
- [9] E. Carroll, S. Klaka, S. Linder, “Integrated Gate-Commutated Thyristor – A New Approach to High Power Electronics”, ABB Semiconductors AG - IGCT Press Conference, IEMDC, Milwaukee, May 1997.
- [10] C.W. Edwards et al., “Advanced Static Var Generator Employing GTO Thyristors”, *IEEE PES Winter Power Meeting*, Paper No. 38WM109-1, 1988

- [11] S. Mori, K. Matsuno, M. Takeda, M. Seto, “Development of a large var generator using self-commutated inverters for improving power system stability” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, No. 1, Feb. 1993, pp. 371- 377.
- [12] C. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, T.W. Case, A. Edris, “Operation of □100 MVAR TVA STATCON”, PE-509-PWRD-0-01-1997.
- [13] C. Schauder, E. Stacey, M. Mund, L. Gyugyi, L. Kovalsky, A. Keri, A. Edris, “AEP UPFC Project: Installation, Commissioning and Operation of the 160 MVA STACOM (Phase I)”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, pp. 1530-1535, October 1998.
- [14] CAVALIERE, CARLOS ANDRÉ CARREIRO Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados [Rio de Janeiro] 2001 XXI, 191 p. 29,7 cm (COPPE / UFRJ, M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, 2001), Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE
- [15] LACERDA, MÁRCIO V. M DE Análise de Statcom Baseado em VSI Multipulso e Quasi Multipulso Visando Simulação em Tempo Real [Juiz de Fora] 2001 vi, 130 p. 29,7 cm (PPEE/UFJF, MG, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2001) Dissertação - Universidade Federal de Juiz de Fora
- [16] F.J.N Martins, Máquina Síncrona Virtual, Outubro 2013
- [17] João Leal Fernandes, Máquina síncrona em regime transitório após brusco Curto-Circuito no estator, Lisboa 2006.
- [18] Decreto Lei nº 186/95 de 27 de julho
- [19] <http://www.cogeneurope.eu/> (Acedido em 15 de Julho 2015)
- [20] Educogen, March 2001 a Guid to Cogeneration
- [21] <http://www.cogenportugal.com/> (Acedido a 29 de Julho de 2015)
- [22] Castro, RMG, *Energias renováveis e produção descentralizada – Introdução à cogeração*. Universidade técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, DEEC/ Área científica de energia. Maio de 2009
- [23] Sérgio da Silva Brandão, Cogeração, Outubro 2004

- [24] Martins Vieira, M. *Auditoria e otimização energética de uma unidade fabril*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- [25] http://www.ansaldoenergia.it/easyUp/file/ansaldo_turbec_microturbines_completerangefold.pdf (Acedido em 30 de Julho 2015)
- [26] <http://www.airliquide.pt/> (Acedido em 30 de Julho 2015)
- [27] Wei-Neng Chang, Chia-Han Hsu, Chang Gung, Transient Stability Enhancement Evaluation of Cogeneration System by Using FACTS Elements, IEEE PEDS 2011, Singapore, 5 - 8 December 2011
- [28] Dionisio Ramirez, Sergio Martinez, Francisco Blazquez, Carmelo Carrero, Use of STATCOM in wind farms with fixed-speed generators for grid code Compliance, 2011 Elsevier
- [29] M.J. Hossain, H.R. Pota, R.A. Ramos, Robust STATCOM control for the stabilisation of fixed-speed wind turbines during low voltages, , 2011 Elsevier
- [30] <http://www.abb.com/cawp/seitp202/d9b74eb2491d55d9c1257ac2004801f7.aspx> (Acedido em 21 de Agosto de 2015)
- [31] <http://tdworld.com/substations/china-installs-statcom> (Acedido em 20 de Agosto 2015)
- [32] Silva Júnior, Gilson Soares da, análise da influencia de um compensador estático de reativos na operação de sistema elétrico industrial com cogeração, Universidade Federal do maranhão, 2008.
- [33] Salgado, Eumir Vergara, estudo comparativo de teorias de potências instantâneas e aplicações em filtros ativos [Rio de Janeiro] 2005 XII, 122 M.Sc., Engenharia Elétrica, 2005) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE
- [34] Evandro M.Sasso, Guilherme G. Sotelo, André A.Ferreira, Edson H.Watanabe, Maurício Aredes, Pedro G. Barbosa, investigação dos modelos de circuitos de sincronismo trifásicos baseados na teoria das potências real e imaginaria instataneas [p-PLL e q-PLL), XIV congresso Brasileiro de automática, Natal – RN, 2 a 5 setembro 2002.

- [35] Almeida Filho, Isidoro Campos Raposo, Estudos e Implementações de Topologias de Restauradores Dinâmicos de Tensão, Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.
- [36] Souza Junior, Roberto Carlos de, Modelagem, controle e avaliação de desempenho de restaurador dinâmico de tensão, Recife, Fevereiro 2011
- [37] Rômulo Miranda Lima de Souza, Pedro Gomes Barbosa, aplicação de STATCOM em redes de distribuição de energia elétrica –topologias e estratégias de controle para compensação de cintilação luminosa.
- [38] Praça Fialho, João Miguel, sistemas de transmissão em HVDC utilizando conversores de potência multinível baseados em inversores trifásicos duplos de dois níveis, Dissertação - Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Outubro 2014.
- [39] Kittaya Somsai, Thanatchai Kulworawanichpong, Nitus Voraphonpiput, Design of DC voltage control for D-STATCOM, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol:6, Novembro 2012.
- [40] Friedrich Frohr, Fritz Orthenburger, Introduction to electronic control engineering. New Delhi: Second Wiley Eastern Reprint, 1992.
- [41] Marian P. Kazmierkowski, R. Krishnan, Frede Blaabjerg, control in power electronics selected problems. California: Elsevier Science, 2002.
- [42] Rodrigues da Costa Diogo, Implementação digital de um circuito *PLL* para a utilização em equipamentos FACTS, Universidade federal de Rio de Janeiro.
- [43] Rocha da Encarnação, Luís José Lamy, Compensação de energia reativa com conversor multinível trifásico, Dissertação - Universidade Técnica de Lisboa-Instituto superior técnico, Outubro 2007.